

UNIVERSIDADE DE LISBOA

INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO



# **INSTABILIDADE DE ARRIBAS E AVALIAÇÃO DA PERIGOSIDADE NO LITORAL DA LOURINHÃ**

Bruno Miguel Gomes Epifânio

Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território

2013



UNIVERSIDADE DE LISBOA

INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO



# **INSTABILIDADE DE ARRIBAS E AVALIAÇÃO DA PERIGOSIDADE NO LITORAL DA LOURINHÃ**

Bruno Miguel Gomes Epifânio

Dissertação orientada pelo Prof. Doutor José Luís Zêzere e pelo Prof.  
Doutor Mário Neves

Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território

2013





## RESUMO

A evolução das arribas ocorre principalmente devido à atividade de movimentos de vertente de diferentes tipologias e dimensões. Este processo natural, que representa uma ameaça para as pessoas, bens e atividades, é uma das principais fontes de perigosidade que caracteriza as arribas do concelho da Lourinhã.

Nesta dissertação determinaram-se as taxas de recuo das arribas e avaliou-se a suscetibilidade a movimentos de vertente e a perigosidade das arribas.

As taxas de recuo das arribas foram estimadas para um período de 60 anos (1947-2007) através da extensão do ArcGIS Digital Shoreline Analysis System e de um conjunto de fotografias aéreas e de ortofotomapas digitais.

A avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente foi efetuada para 3 tipologias de movimentos: deslizamentos rotacionais, deslizamentos translacionais e escoadas. Toda a costa foi dividida em 261 unidades de terreno e foram considerados 9 fatores de predisposição: altura da arriba, declive (máximo, médio e desvio-padrão), radiação solar potencial, curvatura (perfil e planta), litologia e estrutura geológica. Os modelos preditivos de suscetibilidade foram criados para cada tipologia de movimento de vertente utilizando os métodos do Valor Informativo e da Regressão Logística. Subsequentemente, as curvas *Receiver Operating Characteristic* (ROC) e as respetivas Áreas Abaixo da Curva foram utilizadas para avaliar o grau de ajustamento e a capacidade preditiva dos modelos.

A perigosidade das arribas foi avaliada através do mapa de perigosidade. Este mapa foi elaborado a partir de uma matriz que interceta as classes da suscetibilidade ao conjunto dos movimentos estudados com as classes de taxas de recuo da crista da arriba.

Os resultados revelam um recuo das arribas da área de estudo entre 0,01 e 0,13 m/ano e mostram que os deslizamentos rotacionais e o Valor Informativo são, respetivamente, a tipologia e o método estatístico que apresentam melhores resultados. Aproximadamente metade da costa estudada revela perigosidade Elevada a Muito elevada.

**Palavras-chave:** Costa rochosa, arriba, movimentos de vertente, suscetibilidade, perigosidade, concelho da Lourinhã.



## ABSTRACT

The evolution of coastal cliff occurs mainly due to landslide of different type and different size. This natural process, which poses a threat to people, assets and activities, is one of the main natural hazards that affect the coastal cliffs of Lourinhã council.

In this dissertation cliff retreat rates, landslide susceptibility and coastal cliff hazard were evaluated.

Cliff retreat rates were calculated for a 60-year period (1947-2007) using an ESRI's ArcGIS extension - Digital Shoreline Analysis System -, a set of aerial photographs and a digital orthophotomap.

Landslide susceptibility was assessed for 3 landslide typologies: rotational slides, translational slides and debris flows. The studied coastal stretch was split into 261 terrain mapping units and 9 landslide predisposing factors were considered: cliff height, slope angle (maximum, mean and standard deviation), potential solar radiation, slope curvature (profile and plan), lithology and geologic structure. The predictive susceptibility models were developed for each type of landslide using the Information Value and the Logistic Regression methods. Subsequently, standard Receiver Operating Characteristic (ROC) curves and the respective Area Under the Curve were used to assess the degree of adjustment and the predictive capacity of the models.

The coastal cliff hazard was evaluated through an hazard map. This map was created from a matrix that combined the classes of susceptibility values for the set of landslides studied and the calculated cliff retreat rates.

The results indicate that cliff retreat rates of the studied area ranged from 0.01 to 0.13 m/yr, that rotational slides were the best-performing typology and Information Value was the statistical method with the finest results. Nearly half of the studied coastal stretch shows High to Very high hazard.

**Keywords:** Rocky coast, coastal cliff, landslide, susceptibility, hazard, Lourinhã council.



## ÍNDICE GERAL

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE GERAL .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE QUADROS.....	xi
AGRADECIMENTOS .....	xiii
ABREVIATURAS .....	xv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento temático da investigação .....	1
1.2 Objetivos da investigação e fundamentação da seleção da área de estudo .....	6
1.3 Organização da dissertação.....	7
CAPÍTULO 2 – GEODINÂMICA DAS ARRIBAS E AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE GEOMORFOLÓGICA .....	9
2.1 Processos de evolução das arribas .....	9
2.2 Movimentos de vertente .....	13
2.2.1 Deslizamentos .....	16
2.2.2 Escoadas .....	18
2.3 Fatores associados à instabilidade de vertentes.....	19
2.4 Avaliação da suscetibilidade geomorfológica .....	21
CAPÍTULO 3 – ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO .....	25
3.1 Enquadramento geográfico.....	25
3.2 Enquadramento geológico .....	27
3.3 Enquadramento climático .....	33
3.4 Enquadramento oceanográfico .....	34
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DO RECUO DAS ARRIBAS .....	37
4.1 Técnicas utilizadas para a análise das fotografias aéreas.....	37
4.2 Tratamento e processamento das fotografias aéreas.....	38
4.3 Análise quantitativa do recuo das arribas.....	41

CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE.....	47
5.1 Inventariação dos movimentos de vertente .....	47
5.2 Fatores de predisposição da instabilidade.....	51
5.3 Unidades de terreno .....	53
5.3.1 Integração dos movimentos de vertente nas unidades de terreno .....	55
5.3.2 Integração dos fatores de predisposição nas unidades de terreno .....	60
5.4 Métodos estatísticos.....	62
5.4.1 Construção e validação dos modelos de suscetibilidade.....	62
5.4.2 Método do Valor Informativo .....	65
5.4.3 Método da Regressão Logística.....	75
5.4.4 Comparação dos modelos de suscetibilidade .....	85
CAPÍTULO 6 – AVALIAÇÃO DA PERIGOSIDADE .....	87
6.1 Classificação das taxas de recuo das arribas .....	88
6.2 Avaliação e cartografia da suscetibilidade geomorfológica para o conjunto dos movimentos de vertente .....	90
6.3 Integração das taxas de recuo das arribas com a suscetibilidade a movimentos de vertente .....	94
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
ANEXOS .....	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> - Evolução populacional entre 1991 e 2001 nas sub-regiões estatísticas (NUTS3) costeiras da Europa (EEA, 2006a). ....	2
<b>Figura 1.2</b> - Padrões de evolução da linha de costa em alguns países europeus (EEA, 2006b). ....	4
<b>Figura 1.3</b> - Tipos de litoral na costa portuguesa (adaptado de Andrade <i>et al.</i> , 2006)....	5
<b>Figura 2.1</b> - Principais processos envolvidos no recuo das arribas (adaptado de Sunamura, 1992).....	10
<b>Figura 2.2</b> - Diagrama ilustrativo das partes constituintes de um movimento de vertente, usando o exemplo de um deslizamento rotacional (adaptado de <i>Natural Resources Canada</i> , 2012). ....	15
<b>Figura 2.3</b> - Esquema representativo de um deslizamento rotacional (adaptado de <i>IDAHO Geological Survey</i> , 2012).....	17
<b>Figura 2.4</b> - Esquema representativo de um deslizamento translacional (adaptado de <i>IDAHO Geological Survey</i> , 2012).....	18
<b>Figura 2.5</b> - Esquema representativo de escoadas (adaptado de <i>British Geological Survey</i> , 2012). ....	19
<b>Figura 2.6</b> - Fatores dos movimentos de vertente (adaptado de Popescu, 1994 <i>in</i> Zêzere, 2005). ....	20
<b>Figura 3.1</b> - Enquadramento geográfica da faixa costeira do concelho da Lourinhã. ....	25
<b>Figura 3.2</b> - Modelo Digital do Terreno com rede hidrográfica da zona costeira da Lourinhã.....	26
<b>Figura 3.3</b> - Localização da Bacia Lusitana e respetiva dinâmica tectónica (adaptado de Kullberg <i>et al.</i> , 2006). ....	28
<b>Figura 3.4</b> - Litologia da região costeira do concelho da Lourinhã (adaptado da Carta Geológica de Portugal – Folha 30-A). ....	30
<b>Figura 3.5</b> - Setor de arriba em Paimogo com estrutura sub-paralela à linha de costa com inclinação entre 5 e 15° para Sul.....	32
<b>Figura 4.1</b> - Localização de pontos de controlo Comuns ( + ) entre a fotografia aérea ortorretificada de 1947 (A) e o ortofotomapa de 2007 (B). ....	39
<b>Figura 4.2</b> - Transectos e cristas da arriba utilizadas para o cálculo das taxas de recuo das arribas na Praia da Areia Branca (A) e no setor sul de Porto Dinheiro (B). ....	42

<b>Figura 4.3</b> - Taxas de recuo médio anual da crista das arribas para cada unidade de terreno. ....	44
<b>Figura 4.4</b> - Taxas de recuo médio anual da crista das arribas por troços na área de estudo.....	45
<b>Figura 5.1</b> - Movimentos de vertente detetados a partir da análise de ortofotomapas e do traçado das curvas de nível em Porto das Barcas (A) e Porto Dinheiro (Sul) (B). ....	48
<b>Figura 5.2</b> - Movimentos de vertente identificados e validados através de trabalho de campo. A – Escoada na Peralta; B – Deslizamento translacional no Caniçal; C – Deslizamento rotacional em Paimogo; D – Deslizamento rotacional em Porto das Barcas. ....	49
<b>Figura 5.3</b> - Distribuição espacial dos movimentos de vertente identificados nas arribas do concelho da Lourinhã. ....	50
<b>Figura 5.4</b> - Processo de construção das unidades de terreno. A- Delimitação da base e crista da arriba; B – Delimitação das unidades de terreno. ....	54
<b>Figura 5.5</b> - Classificação das unidades de terreno quanto à instabilidade geomorfológica provocada por deslizamentos rotacionais. ....	56
<b>Figura 5.6</b> - Classificação das unidades de terreno quanto à instabilidade geomorfológica provocada por deslizamentos translacionais.....	57
<b>Figura 5.7</b> - Classificação das unidades de terreno quanto à instabilidade geomorfológica provocada por escoadas. ....	58
<b>Figura 5.8</b> - Classificação das unidades de terreno quanto à instabilidade geomorfológica provocada pelo conjunto de todas as tipologias de movimentos de vertente. ....	59
<b>Figura 5.9</b> - Mapa de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos rotacionais segundo o método do Valor Informativo.....	71
<b>Figura 5.10</b> - Mapa de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais segundo o método do Valor Informativo.....	72
<b>Figura 5.11</b> - Mapa de suscetibilidade à ocorrência de escoadas segundo o método do Valor Informativo. ....	73
<b>Figura 5.12</b> - Curvas ROC de predição dos modelos de suscetibilidade produzidos pelo método do Valor Informativo para diferentes tipologias de movimentos de vertente. ....	75
<b>Figura 5.13</b> – Distribuição dos valores médios de suscetibilidade para cada unidade de terreno face ao respetivo desvio-padrão, com respetivas curvas e equações polinomiais de 2º grau. ....	79



<b>Figura 5.14</b> - Mapa de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos rotacionais segundo o método da Regressão Logística. ....	81
<b>Figura 5.15</b> - Mapa de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais segundo o método da Regressão Logística. ....	82
<b>Figura 5.16</b> - Mapa de suscetibilidade à ocorrência de escoadas segundo o método da Regressão Logística. ....	83
<b>Figura 5.17</b> - Curvas ROC de predição dos modelos de suscetibilidade produzidos pelo método da Regressão Logística para as diferentes tipologias de movimentos de vertente. ....	85
<b>Figura 5.18</b> - Curvas ROC de predição dos modelos de avaliação da suscetibilidade produzidos com o Valor Informativo e Regressão Logística para diferentes tipologias de movimentos de vertente. ....	86
<b>Figura 6.1</b> - Taxas de recuo da crista das arribas integradas nas unidades de terreno. ....	89
<b>Figura 6.2</b> - Mapa de suscetibilidade para o conjunto de movimentos de vertente obtido pelo método do Valor Informativo. ....	93
<b>Figura 6.3</b> - Curva ROC de predição do modelo de suscetibilidade produzido pelo método do Valor Informativo para o conjunto dos movimentos de vertente. ....	94
<b>Figura 6.4</b> - Mapa de perigosidade das arribas no litoral da Lourinhã. ....	96



## ÍNDICE DE QUADROS

<b>Quadro 4.1</b> - Erro médio quadrático para cada fração das fotografias aéreas de 1947. .....	41
<b>Quadro 5.1</b> - Características dos movimentos de vertente.....	51
<b>Quadro 5.2</b> - Variáveis morfométricas, respetivas classes e sua distribuição nas unidades de terreno.....	60
<b>Quadro 5.3</b> - Variáveis de origem geológica, respetivas classes e sua distribuição nas unidades de terreno.....	62
<b>Quadro 5.4</b> - Valores Informativos obtidos para as classes dos fatores de predisposição para as três tipologias de movimentos de vertente consideradas. ....	68
<b>Quadro 5.5</b> - Classificação da suscetibilidade aos três tipos de movimentos de vertente de acordo com o método do Valor Informativo.....	70
<b>Quadro 5.6</b> - Coeficientes da Regressão Logística obtidos para as variáveis independentes para as três tipologias de movimentos de vertente consideradas. ....	78
<b>Quadro 5.7</b> - Classificação da suscetibilidade aos três tipos de movimentos de vertente de acordo com o método da Regressão Logística. ....	80
<b>Quadro 6.1</b> - Classes das taxas de recuo das arribas integradas nas unidades de terreno. ....	88
<b>Quadro 6.2</b> - Valores Informativos obtidos para as classes dos fatores de predisposição referentes ao conjunto dos movimentos de vertente.....	90
<b>Quadro 6.3</b> - Classes de suscetibilidade para o conjunto dos movimentos de vertente determinada pelo método do Valor Informativo. ....	92
<b>Quadro 6.4</b> - Matriz de perigosidade resultante da integração das classes de suscetibilidade e das taxas de recuo das arribas.....	95
<b>Quadro 6.5</b> - Distribuição das unidades de terreno na matriz de perigosidade resultante da integração das classes de suscetibilidade e das taxas de recuo das arribas.....	97



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma (mais direta ou indireta) para o desenrolar do trabalho agora finalizado.

Aos meus orientadores, Prof. Doutor José Luís Zêzere e Prof. Doutor Mário Neves, por toda a transmissão de conhecimentos e pela disponibilidade demonstrada, apoio e incentivo no processo de investigação e preciosas sugestões e correções na presente dissertação.

Ao Doutor Sérgio Oliveira pela partilha de conhecimentos bastante relevantes sobre as técnicas de tratamento e processamento das fotografias aéreas.

À Mestre Raquel Melo pela partilha de conhecimentos de grande utilidade referentes à aplicação do método da Regressão Logística através do software SPSS.

Ao Mestre Nuno Fonseca pela disponibilização de todo o material cartográfico digital essencial ao desenvolvimento da investigação.

Aos meus amigos, em especial à Isabel Lima, Flávio Jorge, Ana Sousa e Pedro Morais, que me apoiaram e motivaram durante todo o trabalho, ajudando-me a concluir esta longa etapa.

Por último, mas não menos importante, à minha família, em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram em todo o meu percurso.



## ABREVIATURAS

$\sigma$	Desvio padrão
<b>AAC</b>	Área Abaixo da Curva
<b>APA</b>	Agência Portuguesa do Ambiente
<b>ARH</b>	Administração da Região Hidrográfica
<b>DSAS</b>	<i>Digital Shoreline Analysis System</i>
<b>EEA</b>	<i>European Environment Agency</i>
<b>FA</b>	Fotografia Aérea
<b>INAG</b>	Instituto da Água
<b>IPCC</b>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
<b>kWh/m<sup>2</sup></b>	Quilowatt hora por metro quadrado
<b>MDT</b>	Modelo Digital de Terreno
<b>N</b>	Número de elementos
<b>NUTS</b>	<i>Nomenclature of Units for Territorial Statistics</i>
<b>POOC</b>	Plano de Ordenamento da Orla Costeira
<b>RL</b>	Regressão Logística
<b>ROC</b>	<i>Receiver Operating Characteristic</i>
<b>SIAM</b>	<i>Scenarios, Impacts and Adaptation Measures</i>
<b>SIG</b>	Sistema de Informação Geográfica
<b>SPSS</b>	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>
<b>UNESCO</b>	<i>United National Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
<b>VI</b>	Valor Informativo
<b>WP/WLI</b>	<i>Working Party on World Landslide Inventory</i>



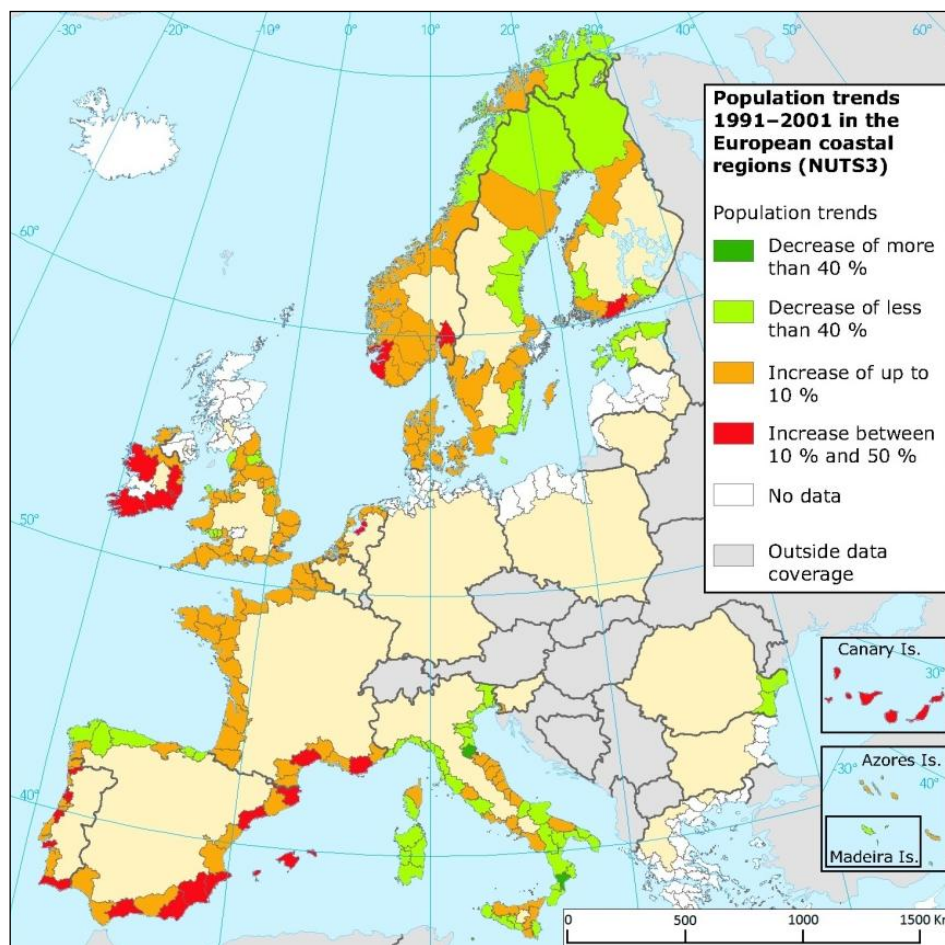


# **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

## **1.1 ENQUADRAMENTO TEMÁTICO DA INVESTIGAÇÃO**

As regiões litorais ostentam características naturais intrínsecas bastante atrativas à humanidade, como o clima ameno, a paisagem marítima e os recursos naturais. Com o surgimento e desenvolvimento de atividades económicas de grande importância como as atividades turísticas, portuárias e industriais, estas regiões do globo ganharam notoriedade. Atualmente assumem uma evidente importância estratégica em termos ambientais, económicos, sociais, culturais e recreativos (Resolução do Conselho de Ministros nº82/2009). O conjunto de fatores de atratividade do litoral tem vindo a despertar um interesse generalizado da população, que procura cada vez mais estas regiões, de forma permanente ou sazonal.

Os sistemas costeiros, presumivelmente mais do que outros sistemas naturais, têm sido expostos a pressões e processos de mudança (Sesli *et al.*, 2009). Ao longo do último século, registou-se uma intensa ocupação antrópica das áreas litorais. Em termos mundiais, cerca de 2/3 das cidades localizam-se a menos de 100 km da linha de costa (Andrade, 1998 *in* Gusmão, 2010) e cerca de 50% da população vive a menos de 60 km da costa (Eurosion, 2004). No que concerne os países europeus, entre 1991 e 2001 registou-se um aumento generalizado da população nas sub-regiões estatísticas (NUTS3) junto à faixa marítima, sem exceções nos casos de Portugal, França, República da Irlanda e Dinamarca (Fig. 1.1).



**Figura 1.1** - Evolução populacional entre 1991 e 2001 nas sub-regiões estatísticas (NUTS3) costeiras da Europa (EEA, 2006a).

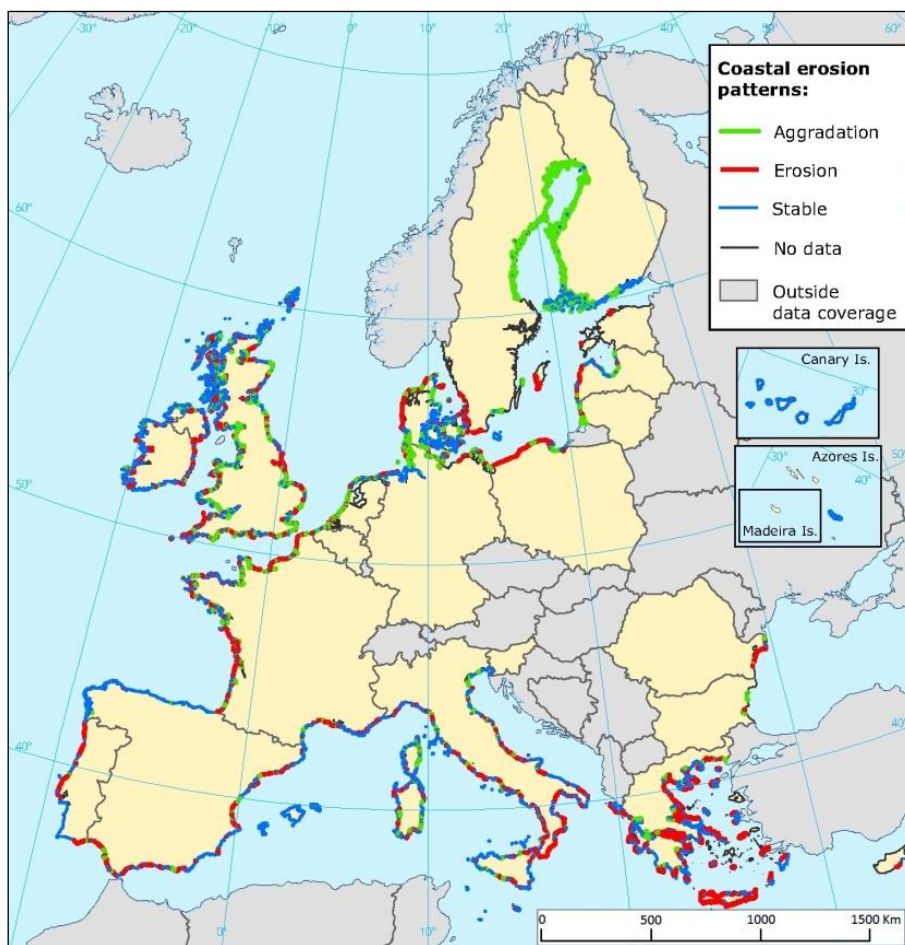
Na zona costeira de Portugal continental, onde atualmente reside 75% da população, tem-se verificado um aumento populacional desde a década de 60 do século XX (Andrade *et al.*, 2006; Resolução do Conselho de Ministros nº82/2009). Deste modo, a densidade populacional no litoral (215 habitantes/km<sup>2</sup>) é manifestamente superior ao valor médio nacional (125 habitantes/km<sup>2</sup>) (Andrade *et al.*, 2006).

Ao nível económico, concentram-se no litoral diversificadas atividades económicas (e.g. indústrias e serviços), sendo que os concelhos do litoral são responsáveis por aproximadamente 85% do Produto Interno Bruto nacional (Andrade *et al.*, 2006). Com o crescente aumento da população nestas áreas, a atividade económica tende a aumentar, principalmente devido à atividade do turismo (Andrade *et al.*, 2006).

No âmbito territorial, estima-se que cerca de 30% da zona costeira de Portugal continental encontra-se ocupada com construções permanentes, que incluem habitações, estabelecimentos de atividades económicas e áreas portuárias (Resolução do Conselho de Ministros nº82/2009). Em muitos casos, estas construções permanentes estão expostas ao perigo da erosão costeira.

Com efeito, a erosão costeira é um fenómeno natural com elevada expressividade que constitui um verdadeiro problema para o ordenamento do território costeiro e gestão do risco associado ao seu uso e ocupação (Marques e Andrade, 2009). Este fenómeno erosivo é um processo geológico que provoca o recuo da linha de costa e, consequentemente, a perda de território emerso de forma linear ou descontínua ao longo de um período de tempo que se sobrepõe à variabilidade inter-anual do sistema (APA, 2012a).

A temática da erosão costeira passou a ser mais documentada quando os núcleos populacionais começaram a apresentar maior risco associado aos efeitos da erosão e do avanço do mar (Santos, 2011). Na atualidade estão disponíveis diversos estudos que apresentam análises e previsões sobre a erosão costeira. O Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (PIAC, em inglês IPCC) divulgou em 2007 as suas previsões a nível mundial, que incluem o aumento do fenómeno de erosão costeira devido a episódios de meteorologia severa, sendo também agravado pelas fortes pressões antrópicas sobre as zonas costeiras (IPCC, 2007). O projeto europeu EUROSION, que teve como objetivos, entre outros, quantificar o estado, impacto e tendências de erosão costeira na Europa, revela que no início do século XXI cerca de 20% da linha de costa enfrentava impactes significativos (Fig. 1.2), estimando-se que 15 km<sup>2</sup> da área emersa é anualmente perdida ou severamente afetada (Eurosion, 2004). Um projeto desenvolvido a nível nacional sobre as alterações climáticas em Portugal (Projeto SIAM) prevê que até ao final do século XXI ocorram modificações no regime de agitação marítima ao largo de Portugal continental, o que poderá originar um agravamento de 15 a 25% no ritmo da erosão costeira em algumas regiões do país (Andrade *et al.*, 2006).



**Figura 1.2** - Padrões de evolução da linha de costa em alguns países europeus (EEA, 2006b).

A zona costeira de Portugal, com 1187 km de extensão (EuroSION, 2004), revela uma elevada dinâmica geomorfológica, que inclui processos naturais potencialmente perigosos, tais como a erosão costeira, galgamentos oceânicos e instabilidades de arribas. Cerca de 25% da zona costeira portuguesa apresenta tendência para a erosão ou erosão já confirmada, sendo as zonas de costas baixas e arenosas as mais vulneráveis a este fenómeno (Andrade *et al.*, 2006). No entanto, as costas rochosas não podem ser esquecidas, pelos problemas associados à instabilidade de arribas. Com efeito, os processos naturais que caracterizam a dinâmica das arribas representam uma ameaça significativa para as atividades e intervenções humanas pela sua excessiva exposição ao perigo, daí resultando riscos para pessoas e bens. Adicionalmente, algumas intervenções antrópicas junto ao topo das arribas tem levado à modificação do sistema natural, induzindo a aceleração dos fenómenos de

instabilidade, através das pressões causadas pelos edifícios, trepidação originada pelos eixos rodoviários e destruição do coberto vegetal.

Uma grande parte das zonas costeiras mundiais (cerca de 80%) é constituída por litorais de arriba (Emery e Kuhn, 1982). Apesar da elevada representatividade destes sistemas, na literatura existente sobre os processos costeiros denota-se um maior enfoque no estudo de outras formas e processos (e.g. dinâmica da praia) que respondem mais rapidamente às mudanças das condições climáticas (Griggs e Trenhaile, 1994).

Em Portugal continental encontram-se dois grandes tipos de sistemas litorais (Fig. 1.3): (i) litorais rochosos; e (ii) litorais arenosos (Andrade *et al.*, 2006).



**Figura 1.3** - Tipos de litoral na costa portuguesa (adaptado de Andrade *et al.*, 2006).

## **1.2 OBJETIVOS DA INVESTIGAÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO DA SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A dissertação que agora se apresenta tem como principais objetivos a avaliação da suscetibilidade das arribas a movimentos de vertente de diferentes tipologias, a determinação das taxas de recuo das arribas usando fotografias aéreas e o desenvolvimento de um mapa que permita identificar as áreas de maior perigosidade das arribas do concelho da Lourinhã, baseado na distribuição espacial do conjunto de movimentos de vertente inventariados e nas taxas de recuo das arribas.

Na presente dissertação pretendeu-se realizar um estudo à escala regional numa área litoral de sistemas rochosos que evidenciasse a instabilidade de arribas e que constituísse, de alguma forma, um problema para as pessoas e bens materiais. Adicionalmente foram consideradas questões logísticas como a proximidade da área de estudo à região de Lisboa, de forma a assegurar uma rápida deslocação ao local sempre que fosse necessário. Neste contexto, a escolha da área de estudo recaiu sobre o setor de arribas costeiras pertencentes ao concelho da Lourinhã, localizado na região centro de Portugal continental.

As notícias divulgadas pelos meios de comunicação social e os relatórios técnicos elaborados por entidades responsáveis pela orla costeira permitiram constatar, numa primeira fase, a problemática dos processos de instabilidade de arribas nesta região, sendo de destacar as seguintes situações: desmoronamento de uma parte da arriba da Praia da Areia Branca que provocou a abertura de uma vala de três metros no jardim de uma habitação; deslocamento de material rochoso da arriba em Porto das Barcas, que já apresentava um estado de erosão avançado; e deslizamento de parte da arriba em Paimogo, levando à interdição do acesso pedonal e de viaturas à respetiva praia. De âmbito mais geral, em 2011, Paimogo e Porto Dinheiro eram duas das três praias que apresentavam situações de maior instabilidade ao longo da zona de intervenção da ARH Tejo.

Os relatórios técnicos mais recentes permitiram identificar as áreas costeiras que suscitam maior preocupação ao nível da instabilidade nas arribas. No relatório da segunda fase de avaliação dos POOC da área de jurisdição da ARH Tejo são referidas

ações de carácter interventivo nas arribas da Lourinhã, principalmente devido à instabilidade associada à evolução das arribas e ocupação do Domínio Público Hídrico na Praia da Areia Branca, Porto Dinheiro, Porto das Barcas e Valmitão (ARH-Tejo, 2010). O Plano de Ação de Proteção e Valorização do Litoral 2012-2015 veio corroborar uma parte desta informação, ao definir a necessidade de efetuar obras de minimização do risco da arriba (intervenções ao nível da defesa costeira e zona de risco) em Paimogo, Praia da Areia Branca, Porto das Barcas, Ponta da Corva e Porto Dinheiro (APA, 2012a).

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação intitulada “Instabilidade de Arribas e Avaliação da Perigosidade no Litoral da Lourinhã” encontra-se organizada em seis capítulos e dois anexos. Após uma breve contextualização do tema em análise, apresenta-se o estado da arte sobre a geodinâmica das arribas e avaliação da suscetibilidade geomorfológica, seguindo-se um enquadramento global da área de estudo, a análise do recuo das arribas e a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente. Posteriormente realiza-se a avaliação da perigosidade das arribas e apresentam-se as considerações finais.

O primeiro capítulo inicia-se com um enquadramento temático da investigação, no qual são referidas as características do litoral, a pressão antrópica sobre o litoral e o fenómeno de erosão costeira. Segue-se a enumeração dos principais objetivos da investigação, fundamentação da seleção da área de estudo e apresentação da organização estrutural da dissertação.

O segundo capítulo, “Geodinâmica das arribas e avaliação da suscetibilidade geomorfológica”, consiste num breve estado da arte que introduz alguns conceitos e terminologias inerentes a esta temática. Este capítulo começa com uma secção que descreve os principais processos que controlam a evolução das arribas, seguindo-se duas secções sobre os movimentos de vertente: classificação e caracterização das tipologias de movimentos estudados nesta dissertação e fatores associados à ocorrência de instabilidades de vertente. Na última secção salientam-se os conceitos

inerentes à avaliação da perigosidade geomorfológica e caracterizam-se as metodologias de avaliação da suscetibilidade.

O terceiro capítulo é dedicado à caracterização da área de estudo. Esta caracterização incide sobre a localização geográfica, a evolução geomorfológica da região, as unidades litológicas e respetivos materiais que constituem as arribas e alguns parâmetros climáticos e processos marinhos observados nesta faixa costeira

O quarto capítulo incorpora a análise do recuo das arribas. Na parte inicial do capítulo abordam-se as técnicas vulgarmente utilizadas e efetua-se o tratamento e processamento das fotografias aéreas, relacionado com a ortorretificação e georreferenciação. Na restante parte do capítulo determinam-se as taxas de recuo médio anual das arribas e apresentam-se e discutem-se os resultados, quer por unidades de terreno, quer pelos troços costeiros previamente definidos.

O quinto capítulo é dedicado à avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente para diferentes tipologias de instabilidades. As primeiras três secções referem-se, respetivamente, ao processo de inventariação dos movimentos de vertente, à caracterização e obtenção dos fatores de predisposição da instabilidade, e à construção das unidades de terreno com a respetiva integração das variáveis dependentes e independentes. Na quarta (e última) secção desenvolvem-se os modelos de suscetibilidade através da aplicação dos métodos do Valor Informativo e da Regressão Logística, procedendo-se à sua validação, comparação e discussão.

O sexto capítulo aborda a avaliação da perigosidade das arribas. Neste capítulo efetua-se inicialmente a classificação das taxas de recuo das arribas e a avaliação da suscetibilidade para o conjunto de movimentos de vertente. Posteriormente desenvolve-se uma matriz de perigosidade e elabora-se o mapa de perigosidade, apresentando e discutindo os resultados obtidos.

A dissertação conclui-se com a apresentação e discussão de um conjunto de considerações finais.



## **CAPÍTULO 2 – GEODINÂMICA DAS ARRIBAS E AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE GEOMORFOLÓGICA**

### **2.1 PROCESSOS DE EVOLUÇÃO DAS ARRIBAS**

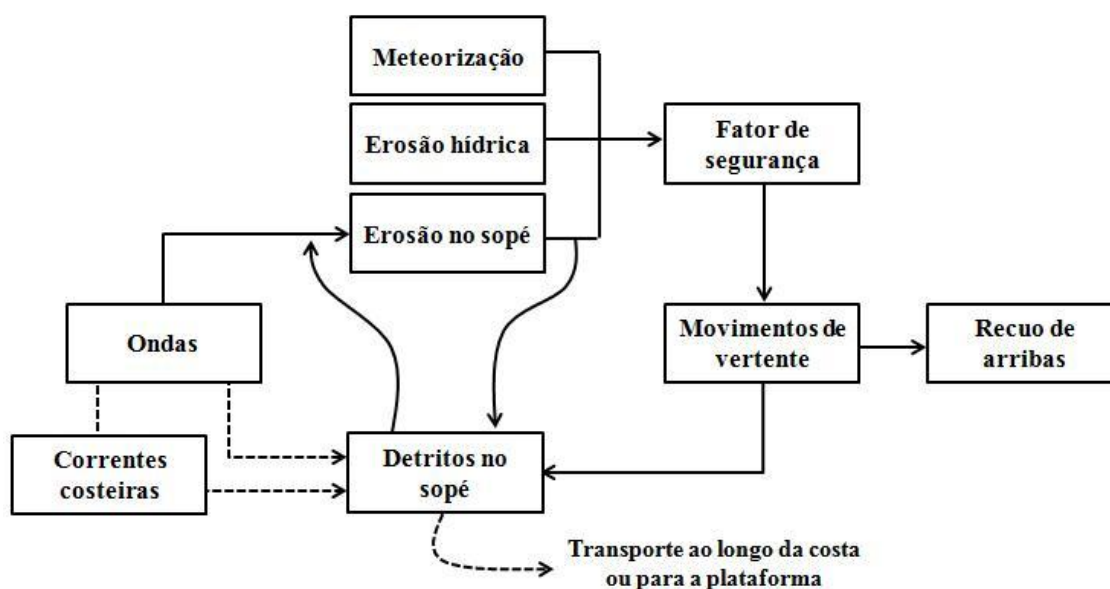
A arriba (*cliff*) pode ser considerada como uma “forma erosiva com declive forte, talhada em rochas coerentes, localizadas frente ao mar, que evolui, no setor cimeiro por processos sub-aéreos, frequentemente condicionados pela instabilização provocada na base por ação direta da ondulação ou por processos (físicos, químicos e/ou biológicos) ligados à presença da água no mar” (Neves, 2004, p.2). Esta definição de âmbito geral proposta por Neves (2004) abrange o conceito de vertente costeira. As morfologias das arribas variam em função do material constituinte da arriba, topografia e tectónica inerente ao território e regime de erosão do passado e presente (Viles e Spencer, 1995).

Em sistemas litorais de arriba, a instabilidade resulta da atuação de diversos processos sobre o maciço rochoso, que por sua vez dependem de diversos fatores de natureza geológica, morfológica, climática e hidrológica. Os movimentos de vertente enquadram-se na tipologia de perigos naturais e podem ser entendidos como um fonte geradora de risco que, por vezes, provoca acidentes com consequências graves para a vida humana, bem como danos estruturais.

A evolução das arribas é um fenómeno difícil de analisar, não só devido à natureza dos processos que inibe a sua medição direta, como também da descontinuidade espaço-temporal que a caracteriza, dificultando assim a aquisição de séries contínuas de observações representativas e rigorosas (Marques e Andrade, 2009). É essencialmente controlada por vários processos que atuam na fachada exposta da arriba e influenciada pelas características dos materiais constituintes (textura e estrutura), tensão induzida por ação da gravidade e energia cinética das ondas aplicada sobre a base da arriba (Lee, 2008).

O processo evolutivo dos litorais rochosos pode ser analisado através do recuo das arribas ou da quantidade de material instabilizado. No caso do recuo das arribas, pressupõe-se a medição do recuo horizontal de um determinado elemento considerado de referência associado à arriba, por exemplo a linha de base ou da crista da arriba, podendo este resultado ser expresso em termos absolutos durante um período de tempo definido ou como uma taxa (e.g. m/ano) (Davidson-Arnott, 2010). Quanto ao material instabilizado, considera-se todo o material depositado junto da base da arriba resultante de processos sub-aéreos ou de processos de ação marinha, devendo ser expresso de acordo com o volume do material, em massa ou em massa por unidade de comprimento (e.g.  $m^3/m$ ) (Davidson-Arnott, 2010).

Sunamura (1992) considera a evolução das arribas tipicamente cíclica, associando-a aos perfis que as arribas apresentam ao longo da atuação dos vários processos. Por ação de processos marinhos que promovem o recuo da base da arriba, esta tende a apresentar um declive progressivamente mais acentuado. A ocorrência de movimentos de vertente, potenciada pela elevada instabilidade inerente ao sistema, pelo contrário, promove declives mais suaves, com a acumulação resultante a conferir à própria arriba maior grau de estabilidade e necessariamente maior equilíbrio dinâmico (Sunamura, 1992). Na Figura 2.1 encontram-se sintetizados os principais processos que controlam a evolução da arriba.



**Figura 2.1** - Principais processos envolvidos no recuo das arribas (adaptado de Sunamura, 1992).

A ação das ondas do mar sobre a arriba desencadeia um processo erosivo na respetiva base (fenómeno de erosão basal), que geralmente conduz à formação de uma sapa e, consequentemente, à perda da base de sustentação da arriba. Esta ação marinha causa tensão sobre a arriba e contribui para o aumento da sua instabilidade (Sunamura, 1992). A ação marinha, juntamente com a ocorrência de processos de meteorização e erosão hídrica, promovem a degradação dos materiais que formam a arriba, geram a diminuição do fator de segurança e, por conseguinte, favorecem o desenvolvimento de movimentos de vertente de várias tipologias (e.g. desabamentos e deslizamentos), do qual resulta o recuo da arriba. O material proveniente do movimento de vertente e resultante da erosão basal deposita-se junto da base da arriba, passando a constituir temporariamente uma proteção de sopé (Sunamura, 1992). Devido à continua ação das ondas na base da arriba, o material é dispersado e transportado para a plataforma continental próxima e/ou ao longo da costa por intermédio das ondas e correntes costeiras. Quando a base da arriba volta a ficar desprotegida, inicia-se novamente todo este conjunto de processos evolutivos, o que confere ao sistema um caráter cíclico e intermitente (Fig. 2.1).

O processo evolutivo das arribas, que se traduz necessariamente no recuo das mesmas, reflete o balanço entre a erosão marinha na base e os processos subaéreos no setor cimeiro (Viles e Spencer, 1995).

O processo de erosão provocado pela ação das ondas geralmente constitui o processo de erosão dominante no sopé das arribas (Marques, 1997). A força erosiva provocada pelas ondas envolve ação hidráulica e ação mecânica, variando com as características das ondas, batimetria e declive do fundo do mar e a quantidade de sedimentos que possam constituir carga abrasiva (Marques, 1997; Neves, 2004). A ação erosiva das ondas é potenciada durante a ocorrência de grandes tempestades marítimas.

Os materiais que se acumulam junto à base da arriba (areias de praia, calhaus ou blocos) constituem formas de proteção da arriba que, ao condicionarem a incidência das ondas sobre o seu setor basal, originam uma redução do ataque das ondas e, necessariamente, menor erosão da base da arriba (Ramos-Pereira, 2008; Gusmão, 2010). A dimensão e topografia da praia e dos sedimentos depositados junto ao sopé

da arriba influenciam a erosão na base desta. Estas características, juntamente com o clima de agitação marítima, determinam a rapidez e grau de facilidade como são mobilizados aqueles materiais (Ramos-Pereira, 2008).

Deste modo, constata-se a dupla função da ação das ondas no processo evolutivo das arribas: erosão do sopé da arriba e transporte do material aí depositado (Trenhaile, 1987 *in* Castedo *et al.*, 2012).

Os processos subaéreos afetam a fachada permanentemente exposta da arriba e englobam processos de erosão hídrica e movimentos de vertente.

A erosão hídrica que afeta as arribas, assim como a maioria das vertentes, efetua-se através do escoamento superficial e escoamento sub-superficial, tendendo a formar e desenvolver canais de escoamento. No caso dos escoamentos superficiais, resultam canais com variadas dimensões (e.g. sulcos e ravinas) formados pelo entalhe das águas pluviais provenientes de precipitações intensas e concentradas, que escoam sobre as vertentes que, frequentemente, estão talhadas em materiais brandos relativamente impermeáveis apresentando reduzida ou inexistente cobertura vegetal (Neves, 2004). Relativamente aos escoamentos sub-superficiais, desenvolvem-se canais subterrâneos em substratos impermeáveis, podendo ocasionar a instabilização do material sobrejacente de características permeáveis (Neves, 2004).

Um contributo para os processos de erosão mecânica das ondas e de erosão hídrica, é a atuação de processos de meteorização, que contribuem para a diminuição da resistência das rochas e, conseqüentemente, para a sua degradação. Consistem em processos físicos e químicos que originam fragmentos e/ou alteração da superfície da rocha, decorrendo quando os agentes atmosféricos e hidrosféricos entram em contacto com a fachada exposta da arriba (Sunamura, 1992; Neves, 2004). Devido a esta tipologia de processos, nas fachadas permanentemente emersas da arriba pode ocorrer erosão por desintegração granular superficial de pequenas partículas ou pequenos agregados de partículas.

Embora os processos associados à erosão hídrica sejam relevantes na evolução das arribas (principalmente naquelas talhadas em rochas argilosas), os movimentos de

vertente são assumidamente os processos mais importantes na evolução das arribas (Sunamura, 1992; Marques, 1997).

Os movimentos de vertente apresentam uma ocorrência descontínua a nível espacial e temporal e assumem escalas dimensionais muito variadas (Marques, 2006). A sua ocorrência é maioritariamente influenciada pela litologia, estrutura geológica e propriedades geotécnicas do material que constitui a arriba, bem como pela magnitude da erosão basal. Entre a erosão basal e a ocorrência de um evento pode haver um intervalo de tempo variável (Sunamura, 1992). A ocupação antrópica do topo das arribas também pode constituir uma fator importante que aumenta o ritmo de evolução do sistema costeiro (Ramos-Pereira, 2008). Os movimentos de vertente, sendo um tema central deste trabalho, encontram-se detalhados no subcapítulo que se segue (Capítulo 2.2).

## **2.2 MOVIMENTOS DE VERTENTE**

Os movimentos de vertente têm sido a causa de algumas catástrofes em diversos pontos do mundo, sendo responsáveis por elevado número de vítimas mortais e avultados danos materiais.

A designação “movimento de vertente” tem sido utilizada na literatura portuguesa como tradução do termo anglo-saxónico *landslide*, recorrentemente utilizado neste idioma e adotado por algumas entidades internacionais, como a *United National Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO), *United Nations Disaster Relief Organization* (UNDRO) e *International Association for Engineering Geology* (IAEG). De uma forma bastante simples e sucinta, os movimentos de vertente são entendidos como um “movimento de descida, numa vertente, de uma massa de rocha, terra ou detritos” (Cruden, 1991, p.27), cujo centro de gravidade do material instabilizado se desloca simultaneamente para jusante e para o exterior (Terzaghi, 1950; Varnes, 1978; Cruden, 1991). Neste termo não são incluídas as avalanches de neve, os movimentos de subsidência (abatimento e assentamento) e os efeitos da expansão/retração dos solos argilosos (Zêzere, 2000).

De acordo com as leis físicas inerentes à mecânica dos solos e estabilidade de vertentes, a instabilidade é condicionada pela atuação de dois conjuntos de forças que atuam em sentidos opostos no sistema (ou seja, na vertente), sendo designadas de tensão tangencial e resistência ao corte do terreno. Da relação entre estas duas componentes, resulta o índice do Fator de segurança (F) da vertente, que permite averiguar o grau de estabilidade do terreno ao longo de uma presumível ou conhecida superfície de rutura (Zêzere, 2005):

$$F = \frac{\text{Resistência ao corte}}{\text{Tensão tangencial}} \quad [2.1]$$

A instabilidade desenvolve-se quando ocorre um aumento da tensão tangencial a que os materiais estão sujeitos ou uma diminuição da resistência ao corte do terreno, originando o deslocamento de material em direção ao sopé da vertente, quando  $F \leq 1$  (Zêzere, 2005).

Embora os afloramentos rochosos e meteorizados sejam particularmente os mais afetados por movimentos de vertente, estes também podem ocorrer em sedimentos não consolidados em arribas costeiras (Gusmão, 2010).

Segundo Zêzere (2000), o conhecimento da tipologia e dinâmica dos movimentos de vertente resulta em grande parte da análise da morfologia interna de cada movimento, baseada na descrição e classificação da respetiva morfologia - e.g. cabeceira, cicatrizes, plano de rutura, áreas de depleção e acumulação e material deslocado (Fig. 2.2).



**Figura 2.2** - Diagrama ilustrativo das partes constituintes de um movimento de vertente, usando o exemplo de um deslizamento rotacional (adaptado de *Natural Resources Canada*, 2012).

O processo de classificação dos movimentos de vertente baseia-se num variado conjunto de critérios discriminantes. As classificações mais complexas contemplam: (i) critérios principais de discriminação – utilizados para determinar os grandes tipos de movimentos; e (ii) critérios secundários de discriminação – utilizados para estabelecer as subdivisões sobre as categorias principais (Zêzere, 2000). Enquanto no primeiro caso é recorrente utilizar o tipo de mecanismo para se efetuar a classificação, já no segundo caso é mais usual a adoção do tipo e dimensão do material deslocado (Zêzere, 2000).

Neste trabalho adotou-se a classificação utilizada por Dikau *et al.*, (1996), que se baseia nas propostas de Varnes (1978) e da WP/WLI (1993b). Esta classificação utiliza o tipo de mecanismo e o tipo material afetado, respetivamente, como critérios principal e secundário de discriminação, e estabelece cinco classes principais de movimentos de vertente: desabamentos, balançamentos, deslizamentos, escoadas e expansões laterais. Destas cinco tipologias, apenas uma não costuma afetar os litorais rochosos: a expansão lateral (Sunamura, 1992).

As tipologias de movimentos de vertente analisadas na presente dissertação correspondem aos deslizamentos e às escoadas. De seguida, descreve-se detalhadamente os referidos movimentos de vertente.

### **2.2.1 DESLIZAMENTOS**

Os deslizamentos (*slides*) são definidos como movimentos de descida de rocha ou solo que ocorrem, de forma dominante, ao longo de planos de rutura ou de zonas relativamente estreitas, sendo alvos de fortes deformações tangenciais (WL/WLI, 1993a; Cruden e Varnes, 1996; Zêzere, 2000).

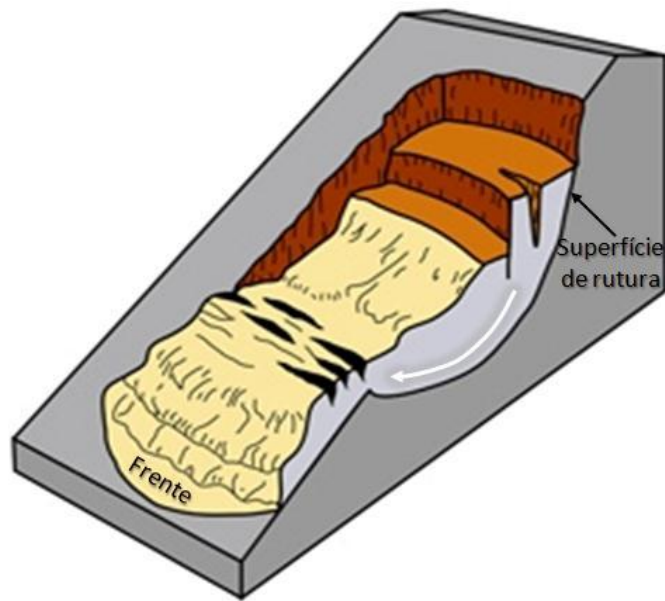
O processo que envolve a ocorrência de deslizamentos, geralmente começa por revelar indícios visíveis de instabilidade no terreno manifestados através de estrias ao longo do plano de rutura e nos flancos, elementos que também permitem o conhecimento da direção da deslocação do material (Cruden e Varnes, 1996).

Os deslizamentos podem ser subdivididos em rotacionais e translacionais, em função da geometria do plano de rutura tangencial (Zêzere, 2000).

#### Deslizamentos rotacionais

Os deslizamentos rotacionais (*slumps; rotational slides*) desenvolvem-se ao longo de planos de rutura côncavos (Fig. 2.3) e em meios geralmente isotrópicos e homogêneos (Varnes, 1978; Zêzere, 1997). Frequentemente, formam-se acíves relativamente pronunciados na superfície topográfica do corpo do deslizamento devido a um abatimento na parte a montante e levantamento na parte jusante, como consequência da rotação do material instabilizado (Hutchinson, 1988 *in* Zêzere, 1997). Esta tipologia de movimento pode afetar vários tipos de material (rocha, detritos e solo) e apresentar diferentes tipos de atividade - simples, múltipla e sucessiva (Dikau *et al.*, 1996).

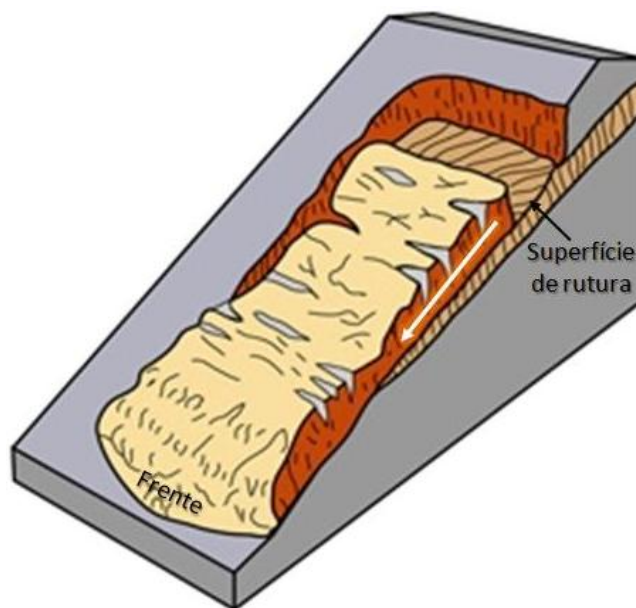




**Figura 2.3** - Esquema representativo de um deslizamento rotacional (adaptado de *IDAHO Geological Survey*, 2012).

#### Deslizamentos translacionais

Os deslizamentos translacionais (*translational slides*) desenvolvem-se ao longo de superfícies de rutura planares ou de reduzida ondulação (Fig. 2.4) em que ocorre a translação do material deslocado em direção à base da vertente (Cruden e Varnes, 1996). Podem ser subdivididos em duas categorias quanto ao tipo de superfície de rutura que apresentam (Dikau *et al.*, 1996): (i) os deslizamentos translacionais com rutura planar ocorrem em meios anisotrópicos e são controlados pela estrutura, uma vez que “o plano de rutura desenvolve-se ao longo de superfícies de fraqueza marcadas por uma resistência ao corte reduzida” (Zêzere, 2000, p.16); (ii) os deslizamentos translacionais com rutura compósita enquadram-se numa transição entre os deslizamentos rotacionais e os deslizamentos translacionais e tendem a apresentar duas secções de rutura diferenciáveis, evidenciando a montante uma rutura circular ou planar com forte inclinação e a jusante uma rutura com inclinação mais reduzida (Zêzere, 2000).

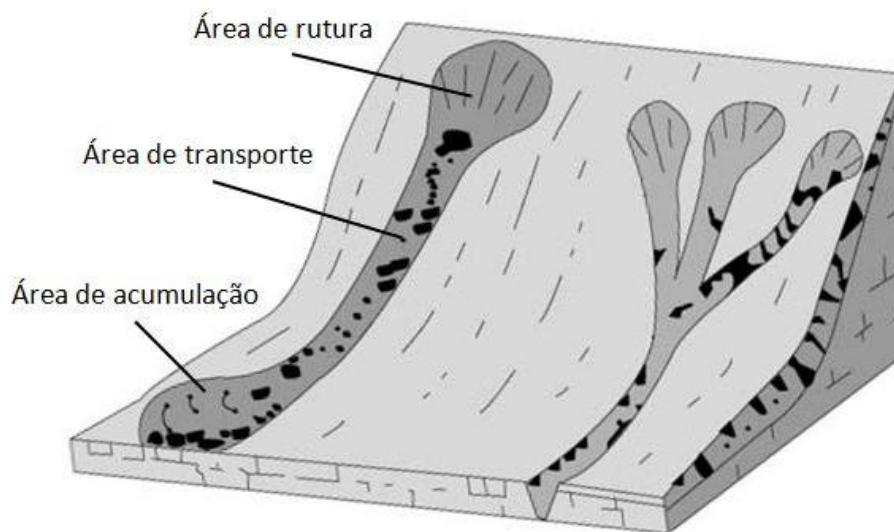


**Figura 2.4** - Esquema representativo de um deslizamento translacional (adaptado de *IDAHO Geological Survey*, 2012).

### 2.2.2 ESCOADAS

As escoadas (*flows*) (Fig. 2.5) consistem em movimentos de massa espacialmente contínuos e possuem superfícies de tensões tangenciais pouco espaçadas, efêmeras e não preservadas que levam, de forma generalizada, a uma considerável deformação interna dos materiais (WP/WLI, 1993a; Zêzere, 2005). Dependendo do tipo de material envolvido, as escoadas podem ser subdivididas em três tipos (Varnes, 1978; Cruden e Varnes, 1996; Zêzere, 2005): (i) escoadas em rocha; (ii) escoadas lamacentas; e (iii) escoadas de detritos. As escoadas de rocha correspondem a deformações gravíticas que afetam formações rochosas bastante diaclasadas ou estratificadas, estando associadas a velocidades de deslocamento muito reduzidas e relativamente contínuas no tempo (Zêzere, 2005). As escoadas lamacentas consistem num fluido viscoso, composto por água e uma considerável quantidade (> 50%) de materiais de reduzidas dimensões (areia, silte e argila), que apresenta grandes variações de velocidade estando diretamente relacionada com o teor em água, carga sólida e declive do canal (Zêzere, 2005; Meneses, 2011). As escoadas de detritos são compostas por materiais finos (areia, silte e argila) e grosseiros (seixos, blocos e calhaus) que tipicamente são desencadeadas por uma invulgar presença de água que, por sua vez, faz deslocar este

material por impulsos sucessivos induzidos pela força gravítica e pelo colapso repentino dos materiais de suporte (Corominas *et al.*, 1996; Zêzere, 2005). Esta tipologia de escoadas, que geralmente segue por canais de drenagem pré-existent (e.g. sulcos e ravinas), promove a ocorrência de erosão dos canais e a formação de diques laterais (formados pela deposição de fragmentos mais grosseiros), levando a um aumento da carga sólida no sistema e, necessariamente, do seu potencial destrutivo (Corominas *et al.*, 1996). Na desembocadura dos canais, o material deposita-se sob a forma de cone ou leque (Fig. 2.5) (Zêzere, 1997).



**Figura 2.5** - Esquema representativo de escoadas (adaptado de *British Geological Survey*, 2012).

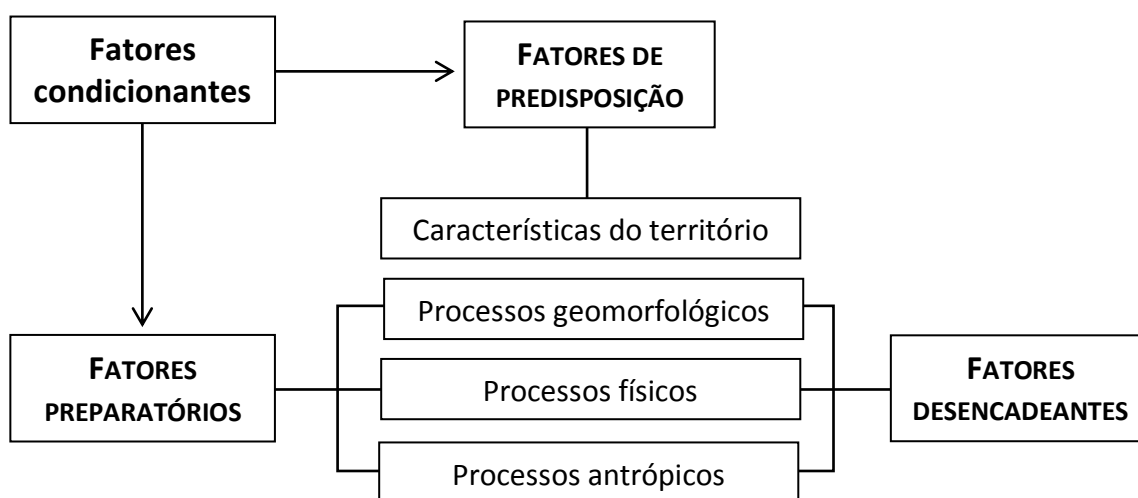
### 2.3 FATORES ASSOCIADOS À INSTABILIDADE DE VERTENTES

Determinar as causas dos movimentos de vertente é uma tarefa complexa pois estes movimentos podem resultar da ação combinada de diversos fatores de instabilidade. Vários investigadores têm apresentado propostas e sistematizações sobre este tema.

Na década de 50, Terzaghi (1950) refere que as causas dos movimentos, entendidos como o conjunto de fatores que atuam sobre a vertente ao longo do tempo, podem ser agrupados em fatores externos e fatores internos consoante têm origem exterior ou interior à vertente. Enquanto os fatores externos contribuem para o aumento da

tensão tangencial (e.g. ação erosiva das onda do mar, trepidação e sobrecarga sobre a vertente), os fatores internos originam a redução da resistência ao corte (e.g. embebedimento em água por parte dos terrenos) (Terzaghi, 1950; Marques e Andrade, 2009).

Popescu (1994), no âmbito da UNESCO *Working Party on World Landslide Inventory*, efetuou uma sistematização das causas dos movimentos de vertente, dividindo-os em função do seu efeito e origem (Fig. 2.6). Enquanto as características do território (geologia, morfologia, morfometria), que não têm uma função de ativação da instabilidade, operam apenas como fatores de predisposição, os processos geomorfológicos, físicos e antrópicos funcionam como mecanismo preparatório ou desencadeante da instabilidade (Fig. 2.6), em função da respetiva intensidade, duração e estágio prévio de estabilidade da vertente (Popescu, 1994).



**Figura 2.6** - Fatores dos movimentos de vertente (adaptado de Popescu, 1994 in Zêzere, 2005).

Mais recentemente, Glade e Crozier (2005) ao estabelecerem três estádios de estabilidade de vertentes (estabilidade, estabilidade marginal e instabilidade ativa), mencionam os três tipos de fatores de instabilidade: de predisposição, preparatórios e desencadeantes.

Os fatores de predisposição (*predisposing factors*), caracteristicamente estáticos e inerentes ao terreno (e.g. litologia, declive, curvatura da vertente), são responsáveis por condicionarem o grau de instabilidade potencial da vertente e determinarem a variação do grau de suscetibilidade do território à ocorrência de movimentos de vertente (Zêzere, 2005). Os fatores preparatórios (*preparatory factors*) são dinâmicos (e.g. ocorrência de precipitação prolongada de fraca intensidade) e responsáveis por provocarem a diminuição da estabilidade da vertente, mas sem desencadear o movimento (Zêzere, 2005). Os fatores desencadeantes (*triggering factors*), por serem os que dão início ao movimento, representam a causa imediata da instabilidade, determinando o ritmo temporal dos movimentos de vertente (e.g. ação das ondas, sismos, escavações) (Glade e Crozier, 2005; Zêzere, 2005).

## 2.4 AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE GEOMORFOLÓGICA

No âmbito do Programa de Ciências da Terra da UNESCO, Varnes (1984) sistematizou a terminologia internacional correspondente à temática dos riscos naturais (Zêzere, 2007), aquando da proposta do seu modelo conceptual do risco que foi bastante aceite e divulgado a nível internacional. No entanto, apesar de tais esforços, no seio da comunidade científica ainda é frequente encontrarem-se diferentes termos para o mesmo conceito (Garcia e Zêzere, 2003).

O conceito de Suscetibilidade (*Susceptibility*), vulgarmente associado a outros termos anglo-saxónicos, como *hazard* e *hazard risk*, é definido como a probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenómeno natural numa dada área, analisada com base na relação espacial existente entre os fatores de predisposição e a distribuição de movimentos de vertente registados no território (Brabb, 1984; Crozier e Glade, 2005; Zêzere, 2005).

Varnes (1984) definiu a Perigosidade natural (*Natural hazard*) como a probabilidade de ocorrência de um fenómeno potencialmente destruidor (e.g. movimento de vertente) numa determinada área e período de tempo. A perigosidade geomorfológica, considerada como uma das componentes da perigosidade natural (Zêzere, 2001a), é

atualmente compreendida como a integração de dois aspetos considerados distintos, mas que se complementam (Zêzere *et al.*, 2004). Enquanto um dos aspetos consiste na avaliação da suscetibilidade, que avalia a componente espacial da perigosidade; o outro visa a determinação da probabilidade de ocorrência da instabilidade de vertente, recorrentemente determinada de forma indireta através da avaliação da probabilidade do evento desencadeador (componente temporal da perigosidade) (Zêzere, 2007).

A avaliação da perigosidade geomorfológica decorrente do modelo conceptual desenvolvido por David Varnes baseia-se em três princípios fundamentais (Varnes, 1984):

- (i) a probabilidade de ocorrência de futuras instabilidades é bastante elevada perante condições muito idênticas às que causaram movimentos de vertente no passado e presente (Princípio do Uniformitarismo);
- (ii) as principais condições que ocasionaram os movimentos de vertente podem ser identificadas, e através do estudo de casos pontuais estas condições podem ser extrapoladas para áreas maiores;
- (iii) os graus de perigosidade podem ser estimados para as várias zonas do território após a determinação da importância relativa de cada fator de instabilidade, recorrendo a metodologias de análise qualitativa ou semi-quantitativa.

Para diversos autores (Gueremy, 1984; Soeters e Van Westen, 1996; Zêzere, 1997), a avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente desenvolve-se ao longo das seguintes etapas:

- (i) inventariação e análise das instabilidades geomorfológicas decorridas no território;
- (ii) identificação e cartografia dos fatores de predisposição que provocaram a ocorrência ou aceleração dos movimentos de vertente;
- (iii) interpretação dos fatores através da utilização de modelos de relação espacial.

A avaliação da suscetibilidade geomorfológica a uma escala regional é efetuada recorrendo a métodos de avaliação relativa. Baseia-se principalmente na localização e distribuição espacial das instabilidades de vertente e dos fatores de predisposição, recorrendo à identificação, análise e cartografia da distribuição das áreas instabilizadas. Estes métodos podem ser agrupados em métodos de cartografia direta e métodos de cartografia indireta.

Os métodos de cartografia direta (também designados por métodos geomorfológicos) baseiam-se no levantamento geomorfológico através do qual são analisados os efeitos das instabilidades ocorridas, de forma a realizar-se a avaliação qualitativa da suscetibilidade (Zêzere, 2005). Nestes métodos, o trabalho desenvolvido pelo investigador (ou grupo de investigadores) é evidenciado por introduzir alguma subjetividade ao longo da avaliação da suscetibilidade, nomeadamente durante a realização das tarefas de levantamento de campo e seleção, ponderação e determinação das combinações com maior relevância entre os fatores, para efetuar o zonamento do território (Zêzere, 2005).

Os métodos de cartografia indireta apoiam-se na análise dos fatores responsáveis pela ocorrência de instabilidades de vertente e no estudo das relações espaciais entre as variáveis (Zêzere, 2005). Juntamente com a representação cartográfica dos fatores de predisposição são obtidas as respetivas pontuações, necessariamente aplicadas sobre as unidades cartográficas previamente definidas (Zêzere, 2005). Comparativamente com os métodos de cartografia direta, os métodos indiretos revelam menor subjetividade na sequência da normalização das técnicas de aquisição, procedimento, análise e representação da informação (Carrara, 1993). Estes métodos podem ser divididos em: (i) métodos determinísticos – baseiam-se em leis físicas e mecânicas que controlam a instabilidade de vertentes (e.g. equilíbrio das forças e conservação da massa e energia); (ii) métodos heurísticos de base empírica (indexação) – consistem na atribuição de *scores* aos vários de fatores de instabilidade passíveis de representação cartográfica; e (iii) métodos estatísticos - recorrem a funções paramétricas empíricas para efetuar a relação entre os fatores de predisposição e a ocorrência de instabilidade passada e presente (Zêzere, 2007).

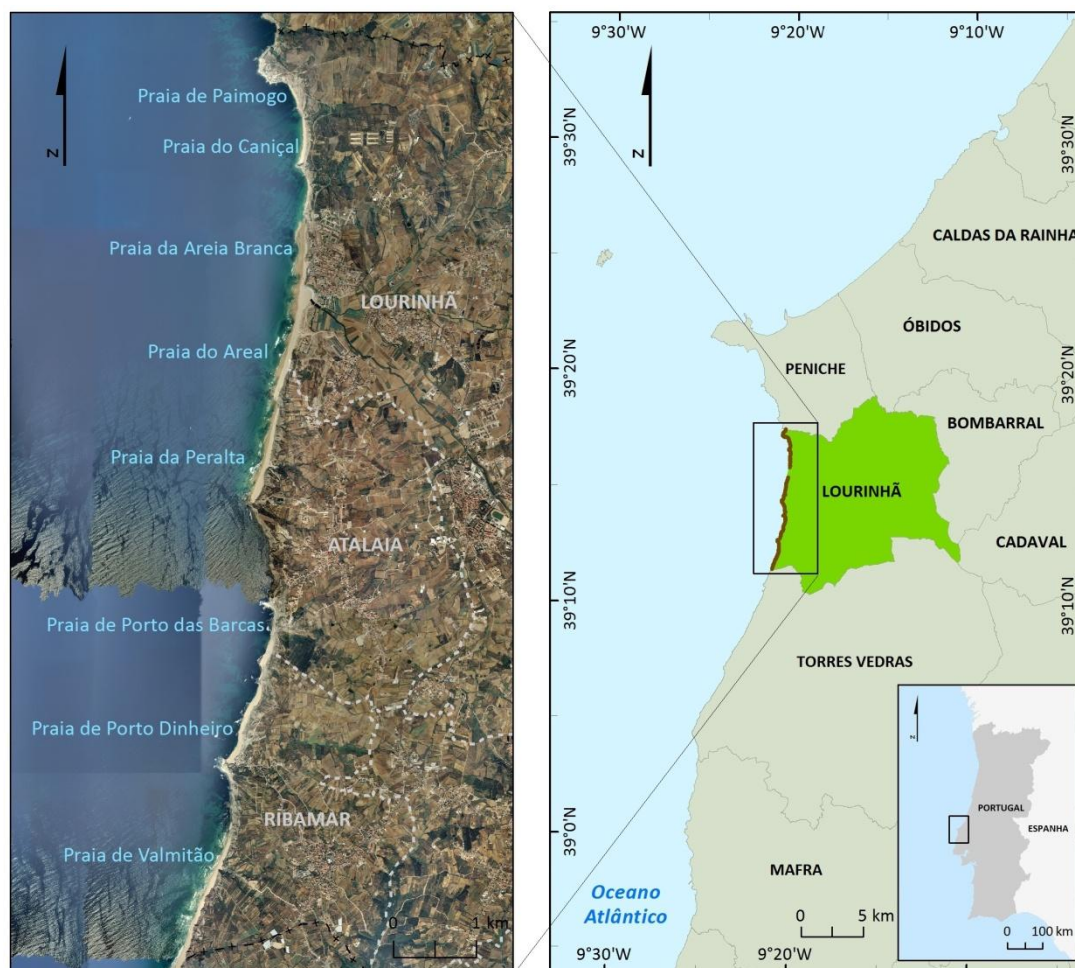
Na atualidade, os métodos de cartografia indireta são os mais utilizados no domínio da avaliação da suscetibilidade geomorfológica, com maior enfoque sobre os métodos de base estatística (Piedade *et al.*, 2011). Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm desempenhado um papel fundamental neste contexto, ao permitirem, cada vez mais, a elaboração de modelos de suscetibilidade consideravelmente complexos, envolvendo o cruzamento de um vasto número de temas cartográficos e a respetiva análise estatística das relações existentes a nível espacial (Reis *et al.*, 2003).



## CAPÍTULO 3 – ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

### 3.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

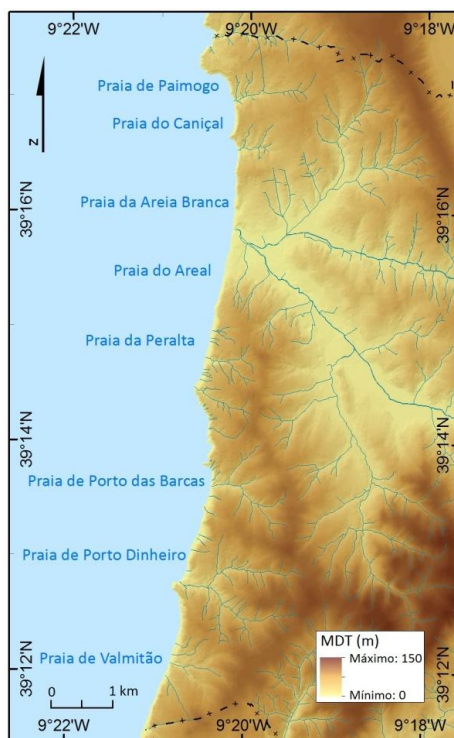
A área de estudo está inserida no concelho da Lourinhã, que pertence ao distrito de Lisboa e integra a região do Oeste (NUTS3). Este município apresenta uma área de 146 km<sup>2</sup>, possui 23 mil habitantes e está limitado a Norte pelos concelhos de Peniche e Óbidos, a Este pelos concelhos de Bombarral e Cadaval, a Sul pelo concelho de Torres Vedras e a Oeste pelo Oceano Atlântico (Fig. 3.1).



**Figura 3.1** - Enquadramento geográfica da faixa costeira do concelho da Lourinhã.

Localizada na orla costeira do centro oeste de Portugal continental, a área de estudo corresponde especificamente ao sistema litoral de arribas do concelho da Lourinhã, sendo limitada a Norte e a Sul pelos limites administrativos do município e a Este e Oeste pela crista e base das arribas, respetivamente. Esta faixa costeira abrange três das onze freguesias do município (Ribamar, Atalaia e Lourinhã) e engloba as seguintes praias deste município: Paimogo, Areia Branca, Areal, Peralta, Porto das Barcas, Porto Dinheiro e Valmitão (Fig. 3.1).

A costa da Lourinhã tem uma extensão de 12,3 km dos quais 11,3 km (92% do total) correspondem a sistemas praia-arriba. As praias são estreitas e as arribas estão maioritariamente expostas ao quadrante Oeste, ao longo de uma faixa litoral que exhibe uma orientação dominante NNE-SSW. A altura das arribas é relativamente variável ao longo da costa, entre 11 e 84 metros (Fig. 3.2). No entanto, constata-se valores mais elevados na região Sul da área de estudo e valores mais reduzidos na região Norte. Esta variação espacial da altura das arribas é concordante, embora de uma forma genérica, com a altitude do território adjacente e localizado mais para o interior do concelho (Fig. 3.2).



**Figura 3.2** - Modelo Digital do Terreno com rede hidrográfica da zona costeira da Lourinhã.

Nesta zona costeira registam-se diversas linhas de água (Fig. 3.2), sendo a maioria de caráter temporário, ou seja, apenas acumulam e transportam água durante e após a ocorrência de episódios de precipitação. Na Praia da Areia Branca desaguardam os dois principais cursos de água do concelho, o Rio Grande e a Ribeira do Toxofal, que constituem uma bacia hidrográfica de 90,5 km<sup>2</sup> (Neves, 2006).

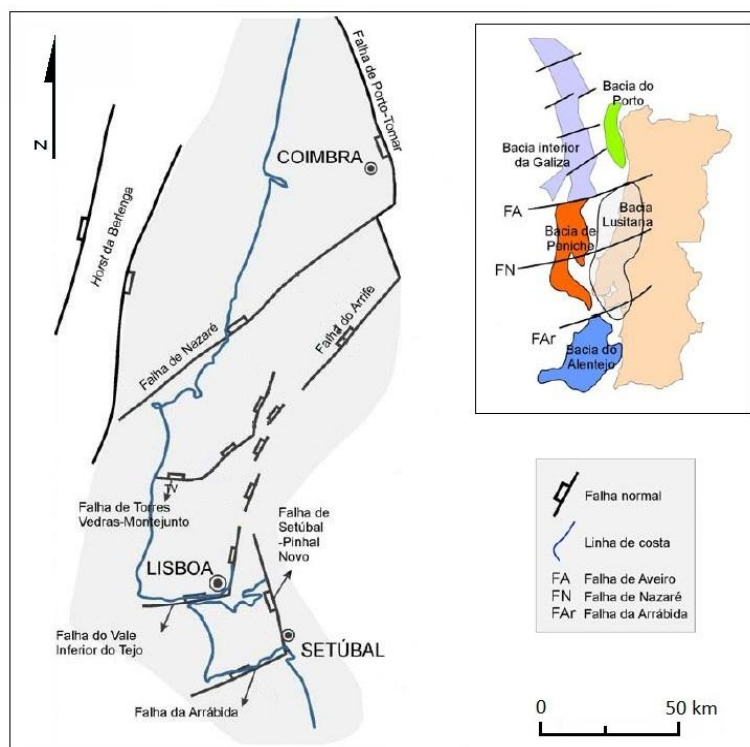
### 3.2 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

O território continental português é constituído por três unidades morfoestruturais principais com características marcadamente distintas: o Maciço Antigo, as Orlas Mesocenozóicas Ocidental e Meridional e a Bacia Cenozóica do Tejo-Sado.

A zona costeira da Lourinhã está inserida na Orla Mesocenozóica Ocidental, mais especificamente na Plataforma Litoral situada entre Peniche e a vertente norte da Serra de Sintra (Daveau, 1973 *in* Chaminé *et al.*, 2004).

O processo de abertura do Atlântico Norte durante a fragmentação da Pangeia originou a formação de uma depressão tectónica sobre a atual Margem Ocidental Ibérica: a Bacia Lusitana. Esta bacia evoluiu em regime tectónico distensivo durante o Mesozóico e sofreu quatro episódios de *rifting* (Ramos-Pereira *et al.*, 2005; Kullberg *et al.*, 2006).

A Bacia Lusitana, inserida numa margem continental do tipo atlântica de *rift* não vulcânica, encontra-se limitada a Este pelo Maciço Antigo, muito próximo da falha Porto-Tomar, e a Oeste pelo *horst* da Berlenga, uma falha normal com uma direção aproximada de NNE-SSW (Fig. 3.3) (Kullberg, 2000). Ocupa uma área superior a 20 000 km<sup>2</sup> (dos quais cerca de 2/3 afloram na área continental) e ostenta uma forma alongada com 200 km na direção NNW-SSE e mais de 100 km na direção perpendicular (Kullberg *et al.*, 2006).



**Figura 3.3** - Localização da Bacia Lusitana e respetiva dinâmica tectónica (adaptado de Kullberg *et al.*, 2006).

Durante o processo evolutivo da Bacia Lusitana sempre se registaram sinais de instabilidade tectónica (Neves, 2004). Desde a sua formação até ao Terciário Superior, ocorreram episódios de subsidência e de levantamento que provocaram a alternância entre os períodos de regressão e transgressão marinha. Posteriormente, com a inversão tectónica da Bacia Lusitana, passou-se a registar um movimento predominantemente ascendente (Neves, 2004).

A deposição de sedimentos oriundos do Maciço Antigo e de uma antiga cordilheira que integrava as Berlengas levou à composição de uma espessa camada de 5 km (Gusmão, 2010). O seu preenchimento teve início no Triásico – Jurássico Inferior, em regime transgressivo e sobre um longo e estreito *graben* que deu origem a formações geológicas de carácter salífero comum a uma grande extensão de sedimentos contemporâneos, que apenas afloram num contexto tectónico particular: o diapirismo (APA, 2012b). Sobrejacente a esta formação, desenvolveu-se um substrato do Jurássico Inferior de natureza calco-margosa constituído por dolomias, margas e calcários dolomíticos, compactos e margosos. Posteriormente formaram-se calcários

relativamente mais puros, bastante espessos e compactos do Jurássico Médio. Sobre esta camada, sucedem-se formações do Jurássico Superior constituídas por sequências de calcários margosos e margas, por vezes intercalados por calcários betuminosos. Já no Cretácico Inferior, registam-se formações detríticas de natureza continental (APA, 2012b).

Com a rotação da Península Ibérica e abertura do Golfo da Gasconha no Cretácico Inferior formou-se o maciço eruptivo sub-vulcânico de Sintra, sendo constituído por granitos, gabros e sienitos com um conjunto filoniano periférico. Neste mesmo período geológico, forma-se o Complexo Vulcânico de Lisboa, numa atividade vulcânica que se estendeu de Lisboa até à região da Nazaré, com a produção de compostos basálticos sob a forma de escoadas (APA, 2012b).

O conjunto de séries sedimentares que se encontra na Bacia Lusitana evidencia um conjunto de fracturações e deformações causadas pela tectónica diapírica, instalação do plutónio de Sintra e movimentos relativos dos blocos (falhas). Algumas destas deformações tectónicas (basculamentos e dobramentos) são visíveis nas formas de relevo e em arribas (INAG, 2001).

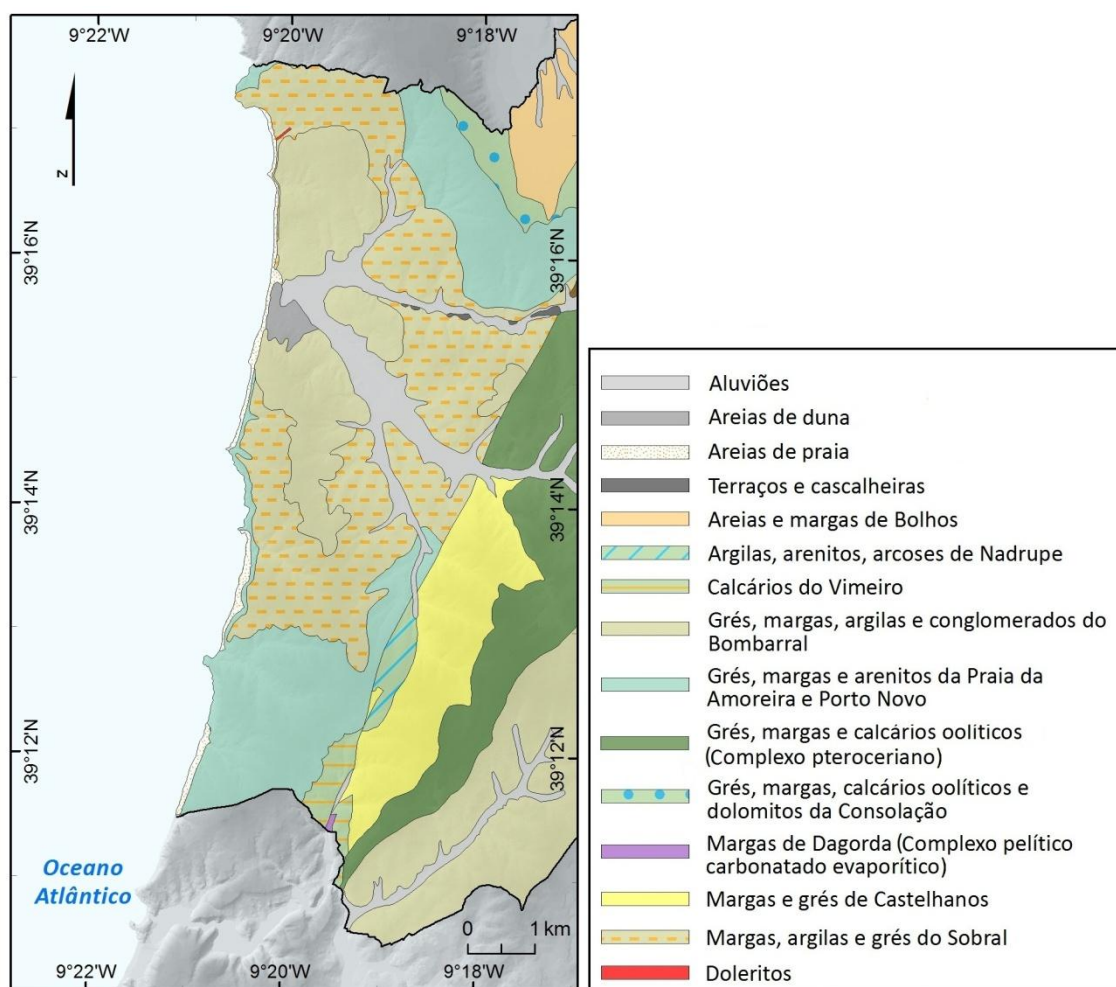
A tectónica diapírica contribui para a ocorrência de dobras em anticlinal, com um raio de curvatura variável, e para o afloramento de calcários do Dogger, que desta forma expõe o núcleo rochoso (APA, 2012b). As serras de Montejunto e dos Candeeiros são dois exemplos que surgiram neste contexto tectónico.

Estas áreas controladas pela tectónica diapírica evidenciam vales correspondentes a depressões originadas por erosão diferencial, frequentemente designados de vales tifónicos (Chaminé *et al.*, 2004). O vale tifónico das Caldas da Rainha tem enorme importância no relevo desta região da Bacia Lusitana. Esta forma de relevo segue um alinhamento tectónico de grande extensão com uma orientação NNE-SSW, inicia-se em Santa Cruz e prolonga-se até cerca de 20 km a Oeste da Serra dos Candeeiros incluindo os diapiros salinos de Santa Cruz, Vimeiro, Bolhos e Caldas da Rainha (Kullberg, 2000; APA, 2012b). Durante o Pliocénico Superior esta grande depressão talhada nas margas hetangianas foi preenchida por areias fossilíferas, à qual se

sobrepuseram areias continentais, que contribuíram para a regularização do fundo da depressão.

Quanto à atividade tectónica na Orla ocidental, esta é caracterizada pela presença de falhas com varias orientações. Os principais acidentes tectónicos têm as orientações NNE-SSW (correspondendo ao alinhamento diapírico anteriormente referido), ENE-WSW e NW-SE. Alguns destes acidentes foram preenchidos por magma, originando, assim, filões de rochas eruptivas básicas (APA, 2012b).

A geologia da área costeira da Lourinhã encontra-se representada na Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000, folha 30-A Lourinhã (Fig. 3.4). Nesta região, ocorrem deformações muito abertas em sinclinal e anticlinal, onde afloram rochas do Jurássico e do Cretácico.



**Figura 3.4** - Litologia da região costeira do concelho da Lourinhã (adaptado da Carta Geológica de Portugal – Folha 30-A).

Na faixa costeira identificam-se três unidades litológicas: Unidade litológica da Praia da Amoreira – Porto Novo; Unidade litológica do Bombarral; e Unidade litológica do Sobral.

A Unidade Litológica da Praia da Amoreira – Porto Novo ( $J^3_{AP}$ ) é composta por duas séries representadas por dois termos: Praia da Amoreira e Porto Novo. A primeira unidade é a mais antiga e apresenta-se constituída por sedimentos continentais como arenitos grosseiros e argilitos. A segunda unidade, que ocorre sobre uma superfície erosiva da primeira unidade, é constituída por depósitos fluviais sedimentares numa faixa de meandros fluviais, constituídos por nódulos argilosos e carbonatados pedogenéticos, com notórias intercalações de depósitos areníticos (Manuppella *et al.*, 1999). A referida série possui 140 metros de espessura, é datada do Kimeridgiano Superior-Titoniano Inferior com base no ostracodo *Cetacella armata* Martin e evidencia bastantes vestígios de dinossauros nesta unidade (não suscetíveis de datação) (Manuppella *et al.*, 1999). Esta unidade aflora na área Norte de Paimogo e entre a praia da Peralta e Valmitão.

A série sedimentar da Unidade do Sobral ( $J^3_{SO}$ ), foi atribuída ao Titoniano – Kimeridgiano superior por Manuppella *et al.* (1999). Apresenta 130 metros de espessura e é formada por pequenas séries de arenitos grosseiros, margas siltosas e argilosas, intercalação de margas arenosas e de argilas siltosas, que contêm vestígios de fauna bêntica e de plantas. Embora corresponda a uma sequência regressiva, os arenitos situados no topo evoluem em série progressiva, indicando um ambiente marinho deltaico (Manuppella *et al.*, 1999). Aflora entre Paimogo e Porto Dinheiro e está, respetivamente, limitada inferiormente e superiormente pela Unidade Amoreira-Porto Novo e Unidade do Bombarral.

Segundo Manuppella *et al.* (1999), a série sedimentar da Unidade do Bombarral ( $J^3_{BO}$ ) apresenta variadas espessuras (entre as dezenas e centenas de metros) e tonalidades (encarnada, verde, cinzenta e amarela). É constituída por sequências siliclásticas continentais siltosas, areníticas e conglomeráticas, com arenitos argilosos e argilas. Adicionalmente encontram-se avultados vestígios de plantas incarbonizadas e de dinossáurios, dado que a respetiva sedimentação ocorreu em meio fluviolacustre. A



Unidade do Bombarral é datada do Titoniano, fechando, assim, o ciclo sedimentar do Jurássico. Sobre esta unidade litológica depositaram-se arenitos argilosos do Cretácico. A referida unidade aflora a Sul de Paimogo (na praia do Caniçal) até a Sul da Atalaia (área Norte da praia de Porto Dinheiro).

Os afloramentos de rochas magmáticas não são frequentes na área de estudo, identificando-se unicamente um filão de dolerito bastante alterado, com direção aproximada NE-SW localizado a Sul de Paimogo, na praia do Caniçal.

Ao longo de uma grande extensão da costa lourinhanense, as areias acumulam-se junto da base da arriba, formando praias arenosas relativamente estreitas e alongadas que, de alguma forma, a protegem do ataque erosivo da ondulação. A exceção corresponde à área imediatamente a Sul da Praia da Areia Branca, onde o sistema praia-arriba é substituído por um sistema praia-duna. As areias de duna formam o sistema dunar em rampa eólica. A morfologia das dunas e distribuição das respetivas areias resultam da componente de transporte eólico de NW, que é a mais importante na evolução deste campo dunar (Manuppella *et al.*, 1999).

No conjunto da faixa costeira da Lourinhã pode considerar-se uma orientação das camadas sedimentares sub-paralela face à linha de costa, embora variando a sua direção e inclinação. Entre Paimogo e Praia da Areia Branca as camadas inclinam entre 5 e 15° para Sul (Fig. 3.5), a área Norte da praia do Areal e a área Sul da praia de Valmitão inclinam entre 0 e 5° para Sul e a restante área, entre a praia do Areal e praia de Valmitão, inclina entre 0 e 5° para Norte.



**Figura 3.5** - Setor de arriba em Paimogo com estrutura sub-paralela à linha de costa com inclinação entre 5 e 15° para Sul.



### 3.3 ENQUADRAMENTO CLIMÁTICO

O clima da zona costeira da Lourinhã é caracterizado, neste trabalho, através dos parâmetros climáticos que apresentam maior relevância e influência direta nos processos inerentes à evolução dos litorais de arriba na área de estudo, nomeadamente, a temperatura do ar e a precipitação. Como apenas se pretende realizar uma breve descrição destes fatores, utilizaram-se os dados tratados por Neves (2006), correspondentes à série de dados das Normais de 1931-1960 registados na estação climatológica do Cabo Carvoeiro. Esta estação está localizada a menos de 100 m de distância do mar e a 32 m de altitude e encontra-se próxima da área de estudo: a cerca de 9 km do limite norte e a 19 km do limite sul.

A temperatura do ar potencia a evolução dos litorais de arriba através dos processos de meteorização. Em arribas que apresentam materiais argilosos na sua constituição, as temperaturas mais elevadas provocam a redução da água da superfície rochosa através do processo de evaporação, potenciando a contração e consequente fragmentação das argilas sujeitas a este processo (Neves, 2006). No Cabo Carvoeiro regista-se uma temperatura média anual de 15,0 °C, verificando-se os valores mais elevados nos meses de Julho a Setembro. A amplitude térmica média anual nesta região é de 6,9 °C, valor que se pode considerar como bastante reduzido (Neves, 2006). Durante o período de tempo analisado (1931-1960) registaram-se temperaturas entre os 0 e 36 °C (Neves, 2006).

A precipitação é um fator importante que contribui indiretamente para a evolução das arribas (principalmente quando estas são talhadas em materiais argilosos), ao promover a erosão hídrica e potenciar a ocorrência de movimentos de vertente (Neves, 2006). Entre 1931 e 1960 registou-se uma precipitação média anual que varia entre 600 e 700 mm para faixa costeira da Lourinhã, com a ocorrência de maior precipitação entre Novembro e Março (Daveau *et al.*, 1977 *in* Neves, 2004). Nos meses de Janeiro, Março, Novembro e Dezembro registam-se os valores de precipitação médios mensais mais elevados, variando aproximadamente entre 70 e 85 mm (Neves, 2006). Segundo Daveau (1988 *in* Neves, 2004), a precipitação no litoral Norte da Estremadura é bastante irregular quer ao longo dos meses, como dos anos. Assim, os

valores médios apenas devem ser interpretados como simples indicadores comparativos.

### **3.4 ENQUADRAMENTO OCEANOGRÁFICO**

Os processos dinâmicos relacionados com o mar, como os regimes de marés e agitação marítima, influenciam o comportamento dos sistemas litorais, alterando o seu ritmo e evolução natural.

A maré consiste na subida e descida periódica do nível das águas, resultante das forças centrífugas geradas pelo movimento de rotação em torno do centro de massa do sistema Terra-Lua e das forças de atração gravitacional entre a Terra e a Lua e a Terra e o Sol. Na costa oeste de Portugal regista-se um regime de marés semi-diurnas regulares. A maré propaga-se de Sul para Norte e cada ciclo de maré apresenta uma duração de aproximadamente 12h25m. A amplitude de maré é considerada elevada, registando uma média de 2,8-2,9 m, oscilando aproximadamente entre 1 m durante as marés mortas, quando a Lua e o Sol estão em quadratura relativamente à Terra, e os 4 m durante as marés vivas, quando a Terra, Lua e Sol estão alinhados (Freitas *et al.*, 2004). Esta grande amplitude da maré acaba por afetar os sistemas rochosos ao longo de uma maior extensão, ficando emersos e submersos de forma intermitente.

As ondas são um dos fatores importantes na dinâmica das arribas dado que contribuem para a modelação do litoral: exercem uma ação mecânica e hidráulica sobre as arribas e promovem os processos erosivos e de transporte e acumulação (Neves, 2004; Ramos-Pereira *et al.*, 2005). O regime de agitação marítima registado na margem continental oeste portuguesa é considerado de alta energia devido às condições meteorológicas registadas no Atlântico Norte. A presença de centros de baixas pressões situadas a noroeste da Europa e das superfícies frontais frias determinam a altura e direção das ondas nesta costa ocidental, considerada como uma das mais ativas e suscetíveis da Europa (Andrade *et al.*, 2006). Ao longo do ano a ondulação é predominante de NW (cerca de 80% das situações registadas) e apresenta uma altura média significativa de 2-2,5 m, podendo atingir os 6 m em situações de

tempestade (Pires, 1989 *in* Neves, 2004). Enquanto no inverno esta ondulação é gerada no bordo NE do Anticiclone dos Açores (localizado na sua posição mais a Sul) ou devido à circulação NW pós-frontal ou depressionária, no Verão resulta da circulação anticiclónica dos Açores que se encontra ao largo da Península Ibérica (Neves, 2004). A ocorrência de ondulação com rumos de W e SW está associada a tempestades geradas por depressões a SW de Portugal continental ou à passagem de sistemas frontais (Pires, 1989 *in* Neves, 2004).

A refração das ondas sobre a linha de costa de forma oblíqua origina a formação da corrente de deriva litoral (Ramos-Pereira, 2001). Esta corrente costeira pode deslocar-se em dois sentidos em função do regime de agitação marítima: quando a ondulação é de NW desloca-se de Norte para Sul, mas quando ocorrem ventos forte de S e SW, obrigando a uma mudança de rumo da ondulação para SW, o sentido da corrente inverte-se e passa a ser de Sul para Norte (Ramos-Pereira, 2001). A corrente de deriva litoral possui uma enorme capacidade de transporte de sedimentos ao longo da linha de costa (Freitas *et al.*, 2004). Esta característica é relevante para a dinâmica dos sistemas costeiros, dado que contribui para a evolução de praias e arribas através do transporte sólido longilitoral (Neves, 2004). No caso das arribas da Lourinhã, o material resultante da instabilidade das arribas não é muito propício ao fornecimento de sedimentos para as praias devido à natureza dos materiais (calcária, margosa e argilosa) que constituem as arribas.



## CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DO RECUO DAS ARRIBAS

### 4.1 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA A ANÁLISE DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS

No processo de avaliação do recuo das arribas, regra geral, recorre-se à análise da posição da base ou da crista da arriba em momentos temporais bem definidos, o que permite calcular a variação espacial daqueles elementos morfológicos num determinado intervalo de tempo. A informação referente à posição da base e/ou da crista da arriba pode ser obtida através de técnicas que documentam a respetiva variação (fotografias aéreas verticais e oblíquas e mapas topográficos) e por medições diretas efetuadas em trabalho de campo (Sunamura, 1992; Young *et al.*, 2009). No estudo realizado por Oliveira (2005), é salientada a necessidade da utilização de uma base de dados que tenha a capacidade de fornecer informações fiáveis sobre a variação da posição da linha da crista/base da arriba ao longo do tempo. As fotografias aéreas, que possuem a capacidade de registar (em formato de imagem) as características geomorfológicas presentes no território num dado momento, são apontadas como sendo a técnica que mais vantagens apresenta (Oliveira, 2005). A frequente utilização de fotografias aéreas como fonte de informação em diversos estudos relacionados com a dinâmica costeira (e.g. Zviely e Klein, 2004; Neves, 2008; Redweik *et al.*, 2009; Hapke *et al.*, 2009; Young *et al.*, 2011) comprova a relevância e adequação desta técnica.

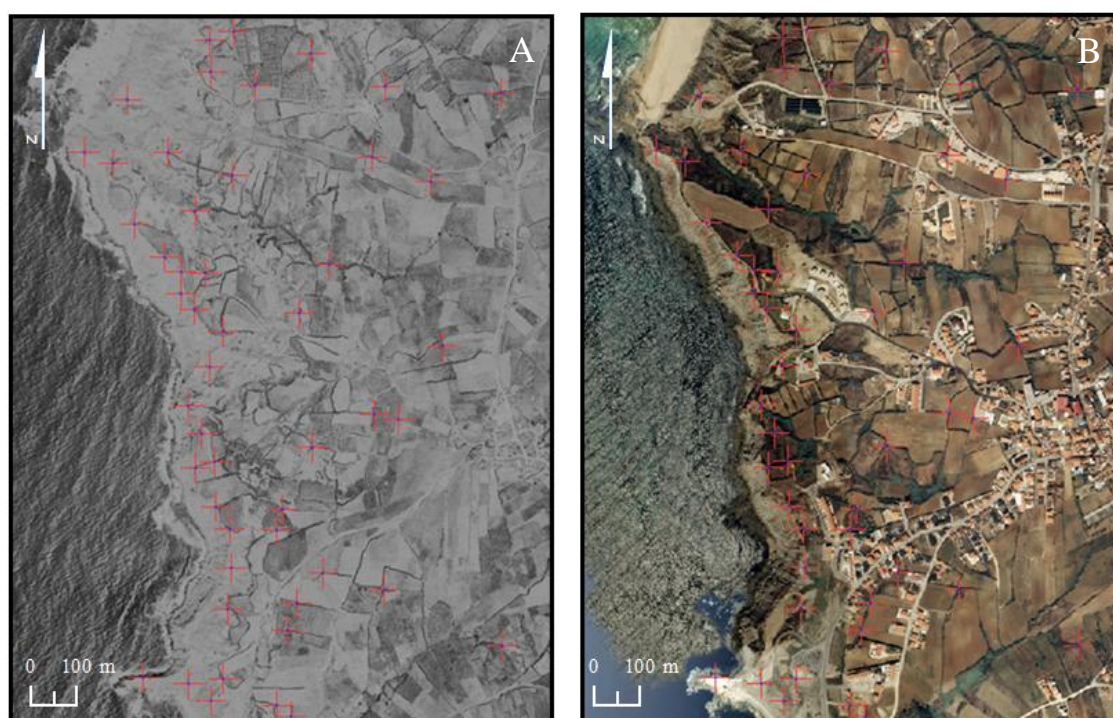
A avaliação do recuo das arribas realizada na presente dissertação é efetuada através da determinação das respetivas taxas de recuo, que resultam da variação da posição da crista das arribas numa série temporal de 60 anos, com duas épocas de estudo: 1947 e 2007. A posição da crista das arribas mais antiga é determinada a partir de um conjunto de fotografias aéreas pancromáticas (preto e branco) de 1947. Este levantamento fotogramétrico foi efetuado pela *Royal Air Force* para o Serviço Cartográfico do Exército (atual Instituto Geográfico do Exército) e destinado a fins cartográficos e militares, tendo dado origem a uma produção de fotografias à escala 1:30 000. A utilização destas imagens no presente trabalho deve-se ao facto de serem

as fotografias aéreas mais antigas que se encontram disponíveis para a área de estudo, permitindo, assim, estudar o fenómeno de erosão costeira numa abrangente janela temporal. A posição recente da crista da arriba é determinada a partir de ortofotomapas digitais georreferenciados do ano 2007, elaborados pelo Instituto Geográfico Português com uma resolução de  $0,25 \text{ m}^2$  (pixel = 0,5 m).

#### **4.2 TRATAMENTO E PROCESSAMENTO DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS**

As fotografias aéreas, no formato em bruto aquando da sua obtenção, não estão associadas a um sistema de projeções cartográficas que permita representar o território no seu formato real. As respetivas imagens estão associadas a uma projeção central e, quando comparadas com documentos cartográficos, apresentam deformações projetivas e perspetivas com maior incidência sobre as áreas mais periféricas da fotografia (Matildes, 2009). Para que seja possível efetuar marcações ou medições sobre as fotografias aéreas, torna-se necessário adotar medidas que visem a correção das fotografias de modo a que as imagens estejam representadas segundo uma escala homogénea em toda a fotografia. Neste encadeamento surge a necessidade de ortorretificar e, necessariamente, georreferenciar as fotografias aéreas. O processo de ortorretificação e georreferenciação de fotografias aéreas é efetuado recorrendo à triangulação aérea, que se baseia na utilização de um conjunto de pontos de controlo (também designados de pontos fotogramétricos). As coordenadas destes pontos podem ser obtidas diretamente no campo através de levantamentos realizados com equipamentos GPS (*Global Position System*) ou de forma indireta através de mapas ortorretificados, por exemplo. Ambas as metodologias consistem na utilização de pontos homólogos que devem estar presentes em ambas as épocas em estudo e serem imutáveis ao longo do tempo. O rigor da triangulação aérea é proporcional ao número de pontos considerado e a seleção destes elementos deve ser efetuada de forma criteriosa: devem ser facilmente identificáveis em ambas as épocas, possuírem contornos bem definidos e estarem distribuídos de modo uniforme ao longo da área de maior interesse (Oliveira, 2005).

No presente estudo, com o objetivo de promover um melhor ajustamento das fotografias aéreas face ao terreno e tendo em consideração a escala de trabalho (escala regional), optou-se por segmentar as fotografias aéreas em duas frações e utilizar apenas as áreas mais centrais das fotografias originais, excluindo desta forma as áreas das fotografias aéreas que apresentam maiores distorções e manchas escuras nos cantos das imagens. As fotografias aéreas foram ortorretificadas e georreferenciadas para o sistema de coordenadas *European Terrestrial Reference System 1989 Portugal Transverse Mercator 2006* (ETRS 1989 Portugal TM06) através de imagens mais recentes: os ortofotomapas de 2007. Este processo foi realizado de forma não-automática recorrendo ao *software* ArcGIS 9.3.1 e à ferramenta *Georeferencing* que utilizou o método de ajustamento (da imagem aos pontos de controlo) *Spline*. Foram utilizados como pontos de controlo as esquinas de muros, casas e de propriedades, as intersecções de estradas e os poços, sempre com maior incidência espacial sobre as áreas adjacentes à crista das arribas, por serem as áreas de maior interesse para o presente estudo (Fig. 4.1).



**Figura 4.1** - Localização de pontos de controlo Comuns ( + ) entre a fotografia aérea ortorretificada de 1947 (A) e o ortofotomapa de 2007 (B).

O processo de identificação dos pontos de controlo revelou-se bastante complexo e moroso devido, fundamentalmente, à reduzida presença de pontos homólogos entre as duas épocas e que demonstrassem características que permitissem assegurar o exatidão das suas marcações. Tal adversidade poderá ser explicada pelas alterações do uso do solo ao longo dos 60 anos considerados. Para além disso, a inexistência de pontos de controlo entre a crista da arriba e o mar, bem como a reduzida resolução e o fraco contraste das fotografias aéreas utilizadas e ainda a existência nestas de manchas provocadas pelo reflexo do sol sobre o mar dificultaram o processo de correção das fotografias aéreas.

Os métodos adotados na correção das fotografias aéreas podem ser avaliados através da exatidão posicional horizontal resultante do respetivo processo. Segundo Gulyaev e Buckeridge (2004), este valor geralmente varia entre 1 e 5 metros. O erro associado às fotografias aéreas foi determinado de forma automática através da aplicação de uma função polinomial de 1º grau que analisa o ajustamento entre cada conjunto de pontos de controlo homólogos, de acordo com o Erro Médio Quadrático (EMQ) das diferenças. O valor resultante deste cálculo referente ao conjunto de valores intervenientes é sempre positivo e indica quanto os valores variam relativamente ao valor de referência. Quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores em causa. Tendo em consideração que as fotografias aéreas apenas serão utilizadas para se efetuar a vectorização da crista das arribas, determinou-se a exatidão do processo de ortorretificação baseada nos pontos de controlo que se encontram a menos de 500 metros de distância da crista da arriba. O erro foi determinando para cada segmento de fotografia aérea, tendo sido posteriormente determinado o erro médio da área de estudo (Quadro 4.1).



**Quadro 4.1** - Erro médio quadrático para cada fração das fotografias aéreas de 1947.

Fração	Número de pontos	Erro de ortorretificação (m)	Erro médio de ortorretificação (m)
5086S	54	3,67	4,73
5089N	46	3,95	
5089S	51	3,97	
5039N	40	4,48	
5039S	38	5,54	
5042N	47	7,35	
5042S	53	4,18	

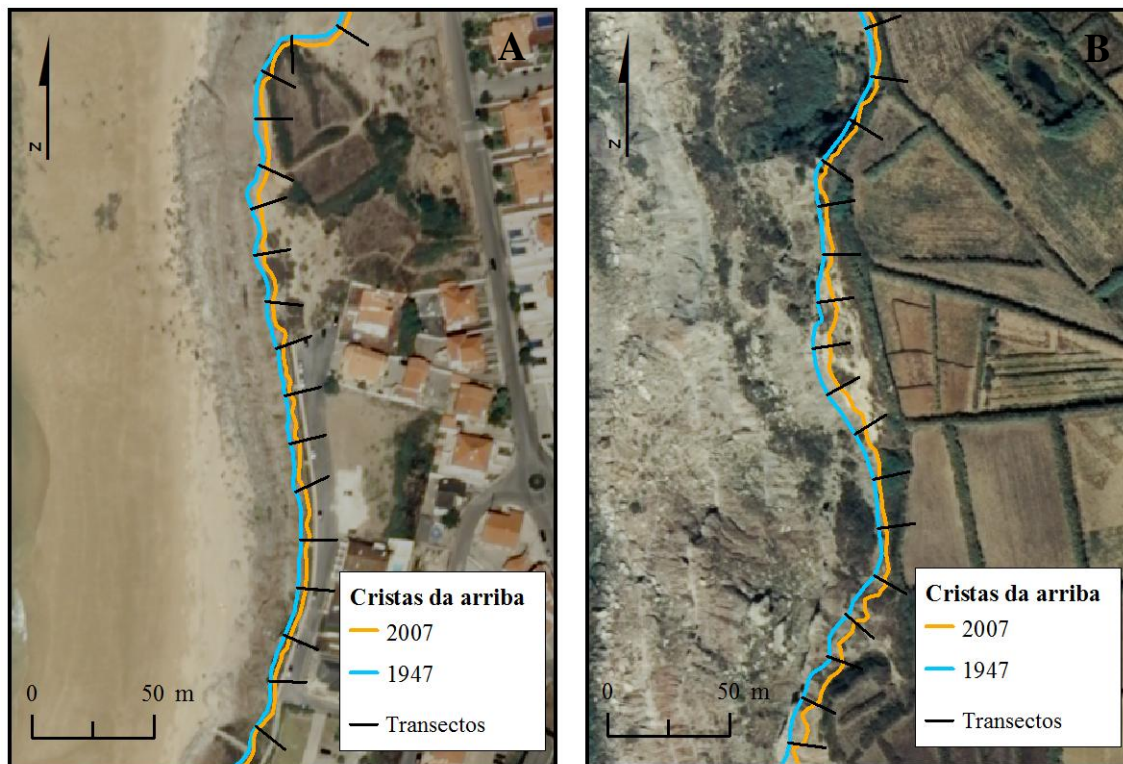
Num total de sete fotografias aéreas e 329 pontos de controlo identificados (26,7 pontos/km de linha de costa), o erro de georreferenciação varia entre 3,67 e 7,35 metros, sendo o erro médio para a área de estudo de 4,73 metros. À exceção de dois casos (5039S e 5042N), o erro de ortorretificação é inferior a 4,5 m (Quadro 4.1).

Após o trabalho de correção das fotografias aéreas, determinou-se a posição das cristas das arribas e vetorizou-se a respetiva linha através de trabalho de foto-interpretção com recurso ao conjunto de fotografias áreas e ortofotomapas já referidos. Adicionalmente foram utilizadas curvas de nível sobre os ortofotomapas, de forma a permitir uma melhor delimitação das cristas.

### 4.3 ANALISE QUANTITATIVA DO RECUO DAS ARRIBAS

A existência de programas que permitem obter taxas de evolução da linha de costa, de forma automática e expedita, constitui uma mais-valia no processo de avaliação sistemática destes ambientes considerados muito dinâmicos. Neste estudo foi utilizada a ferramenta *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) (Thieler *et al.*, 2005) que estende as funcionalidades do *software* ArcGIS 9.3.1 ao permitir a obtenção de taxas de recuo de forma rápida e automática. Esta ferramenta, utilizada para calcular as variações da linha de costa, recorre à criação de transectos equidistantes e

perpendiculares a uma linha de referência. A linha de referência adotada é coincidente com a linha da crista da arriba mais antiga, e os transectos apresentam um espaçamento de 20 m (Fig. 4.2).



**Figura 4.2** - Transectos e cristas da arriba utilizadas para o cálculo das taxas de recuo das arribas na Praia da Areia Branca (A) e no setor sul de Porto Dinheiro (B).

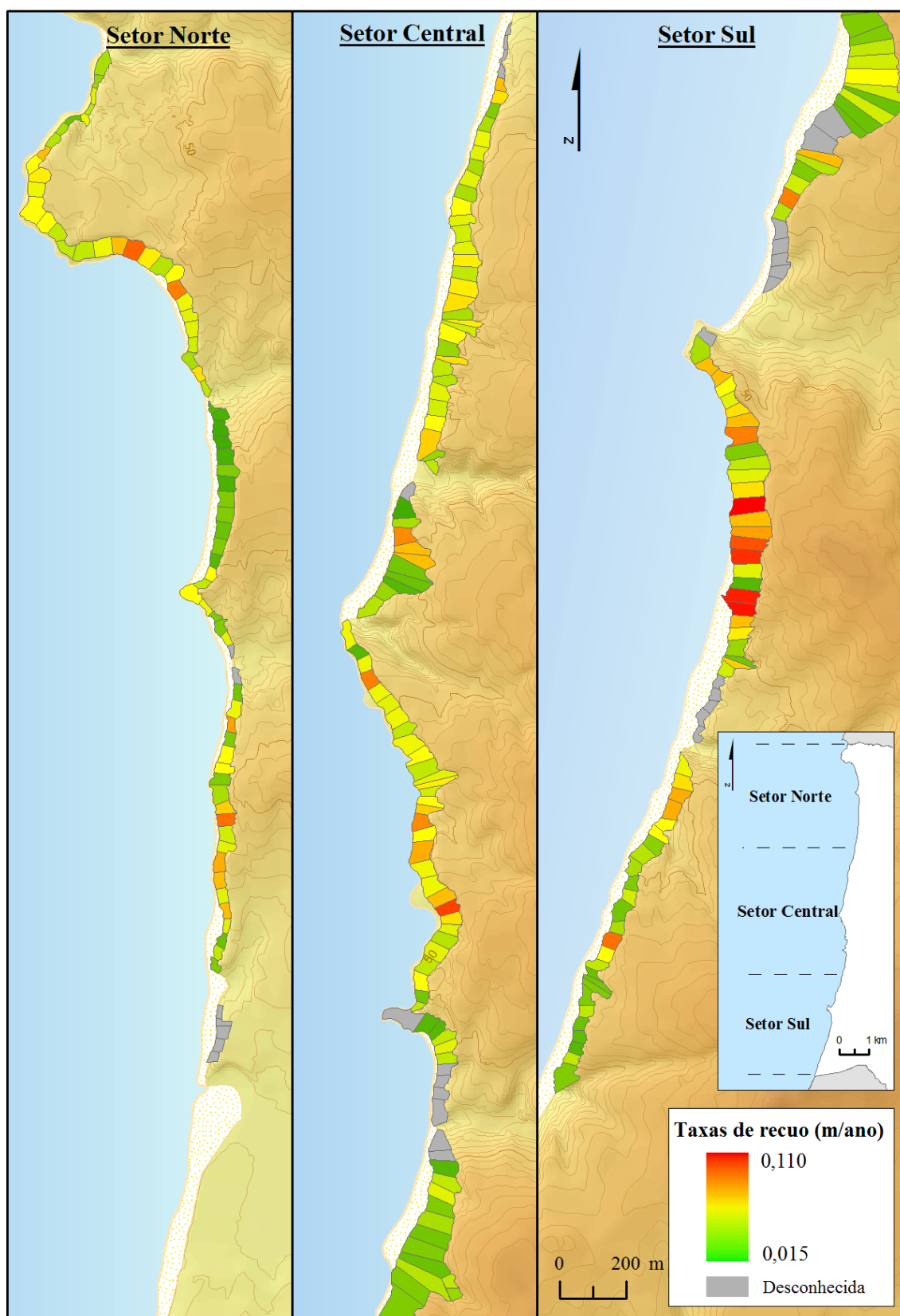
Dos diversos métodos disponibilizados pelo DSAS para a obtenção das taxas de recuo, optou-se pela utilização do *End Point Rate*. Este método consiste na divisão das distâncias entre as linhas da crista da arriba pelo intervalo de tempo decorrido, e caracteriza-se pela sua fácil computação e reduzidos requisitos mínimos (apenas duas linhas de cristas da arriba para diferentes períodos de tempo) (Himmelstoss, 2009).

Tal como referido anteriormente, a posição da crista da arriba mais antiga deriva da informação contida nas fotografias aéreas de 1947. Apesar das medidas tomadas no sentido de reduzir os erros, os deslocamentos e distorções das fotografias aéreas induzem erros significativos nas taxas de recuo da arriba (Moore e Griggs, 2002). Neste caso em que estão em análise dois conjuntos de imagens de diferentes épocas, segundo Moore e Griggs (2002), é possível considerar-se para as taxas calculadas

apenas o erro resultante da ortorretificação que deriva das fotografias aéreas (calculado anteriormente).

Em alguns locais, a delimitação rigorosa da crista da arriba foi comprometida pela ausência de pontos de controlo nas fotografias aéreas de 1947 ao não permitir realizar a ortorretificação com um nível suficientemente bom, devido ao fraco contraste visual de algumas áreas representadas nas fotografias e alterações do uso e ocupação do solo que ocorreram ao longo do intervalo de tempo considerado. Neste contexto, optou-se por não determinar a posição da crista das arribas ao longo de um total 1,1 km de extensão da costa em estudo (9,3% do total) (Fig. 4.3) devido ao aumento de incertezas que iria incrementar no trabalho.

Através da ferramenta DSAS obtiveram-se taxas de recuo da crista das arribas que oscilam entre 0,010 e 0,130 m/ano. Uma vez que a variação da posição da crista das arribas é reduzida face à escala de visualização possível de apresentar neste trabalho, optou-se pela utilização das unidades de terreno para representar as taxas de recuo num mapa não-classificado (Fig. 4.3). Para tal, determinou-se a média das taxas de recuos inseridos em cada unidade de terreno, para um total de 229 unidades de terreno.



**Figura 4.3** - Taxas de recuo médio anual da crista das arribas para cada unidade de terreno.

Na presente área de estudo, as taxas de recuo da crista das arribas são bastante variáveis a nível espacial (Fig. 4.3), variando entre 0,015 e 0,110 m/ano e conferindo a este território uma taxa de recuo médio de 0,044 m/ano. No entanto, a Figura 4.3 evidencia no setor Norte a Praia do Caniçal com um setor de arriba com taxas de recuo relativamente reduzidos, e nos restantes dois setores, nas áreas a Sul de Porto das Barcas e de Valmitão com reduzidas taxas de recuo. O setor sul de Porto Dinheiro destaca-se por apresentar um recuo generalizadamente elevado. Pretendendo-se avaliar o recuo da crista das arribas de forma mais integrada em pequenas áreas, evitando uma análise pontual a nível espacial, efetuou-se a divisão da área de estudo em pequenos troços costeiros. De acordo com a localização geográfica das arribas, determinaram-se as taxas de recuo médio para nove setores (Fig. 4.4). Em concordância com a Figura 4.3, verifica-se que o setor Porto Dinheiro (Sul) apresenta o maior recuo médio, com uma taxa de 0,060 m/ano, e os setores Caniçal e Valmitão (Sul) com os recuos mais reduzido, 0,029 e 0,031 m/ano, respetivamente.



**Figura 4.4** - Taxas de recuo médio anual da crista das arribas por troços na área de estudo.



## **CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE**

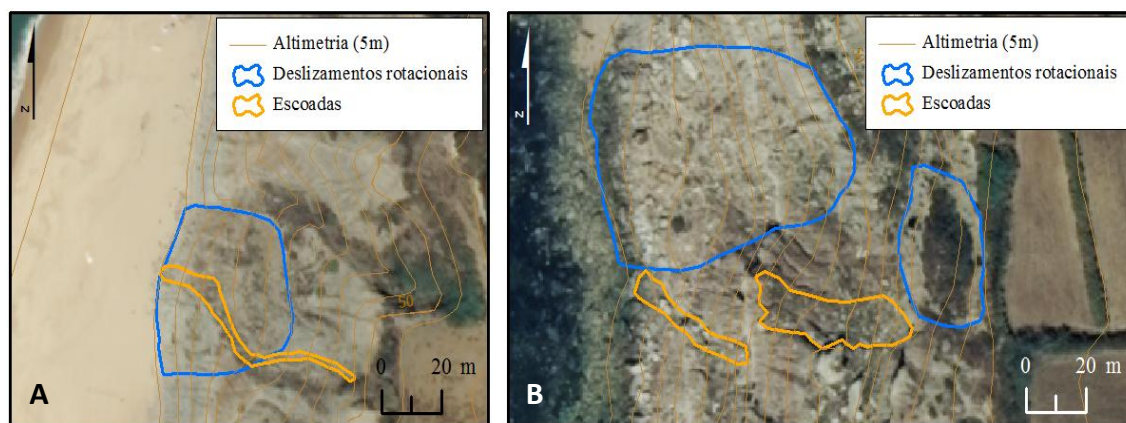
### **5.1 INVENTARIAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE**

O inventário de instabilidades contendo a localização espacial dos movimentos de vertente inventariados é considerado essencial no processo de avaliação da suscetibilidade à instabilidade geomorfológica (Pereira, 2009). Segundo Malamud *et al.* (2004), a robustez, fiabilidade e resolução do inventário é condicionada pela idade do movimento, qualidade e escala da cartografia utilizada, complexidade geológica e geomorfológica, tipos e alterações do uso do solo e experiência do geomorfólogo.

O inventário de movimentos de vertente, elaborado no âmbito da presente dissertação, foi criado através da interpretação de fotografias aéreas ortorretificadas (ortofotomapas digitais obtidos em 2007 com pixel=0,5 m) e altimetria do terreno (curvas de nível com equidistância de 5 m) e da realização de trabalho de campo sistemático.

Numa fase inicial, referente ao trabalho de foto-interpretação realizado em gabinete, identificaram-se os movimentos de vertente à escala de visualização 1:1500, através do aspeto e diferente coloração do terreno ao longo da face da arriba. Adicionalmente, as curvas de nível foram projetadas sobre os ortofotomapas e subsequentemente interpretadas, nomeadamente pelas inflexões em direção à crista e base da arriba, indicadoras da existência de áreas de depleção e de acumulação, respetivamente. Desta forma foi possível a identificação de superfícies de rutura e de acumulação de detritos, bem como a delimitação das formas de instabilidade (Fig. 5.1).



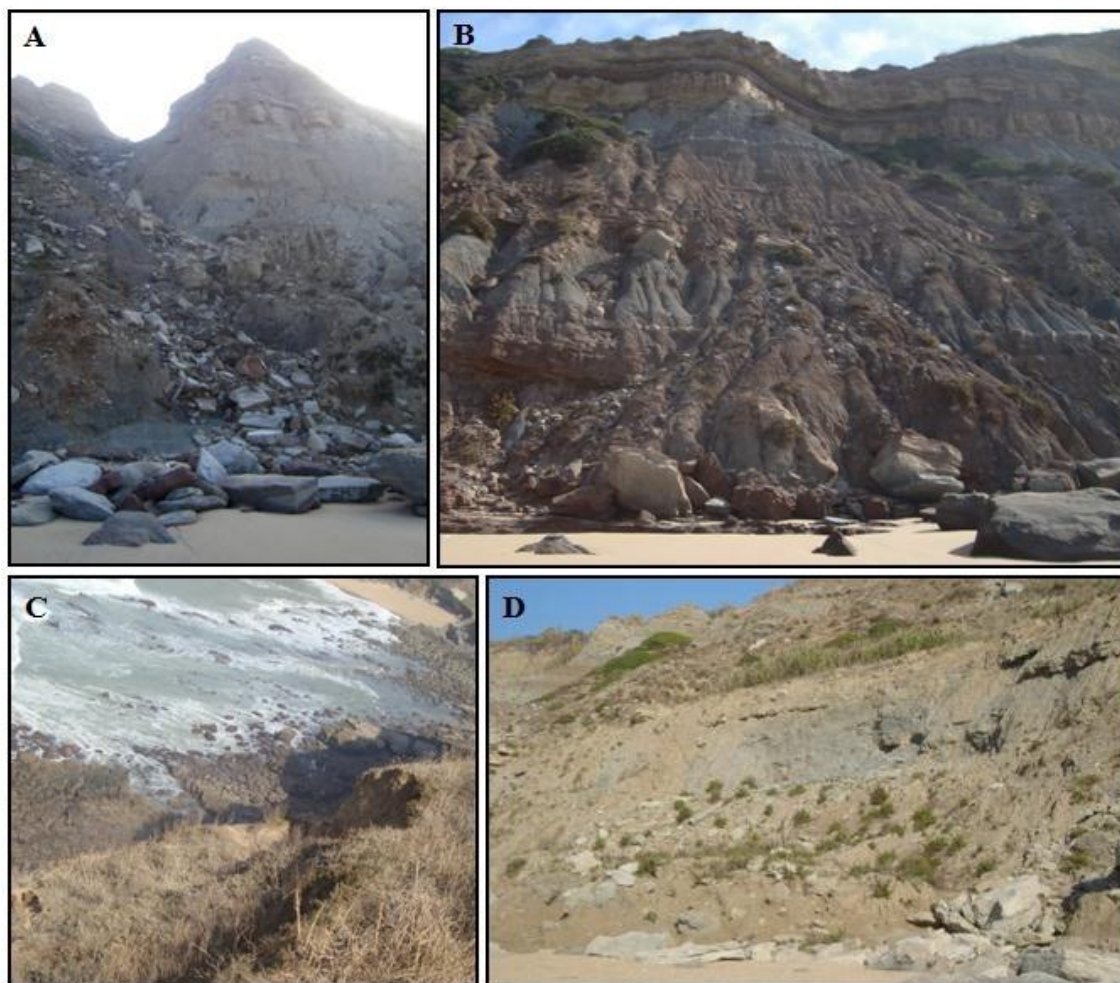


**Figura 5.1** - Movimentos de vertente detetados a partir da análise de ortofotomapas e do traçado das curvas de nível em Porto das Barcas (A) e Porto Dinheiro (Sul) (B).

A interpretação de fotografias aéreas em arribas costeiras, com a finalidade de detetar movimentos de vertente na arriba, revela ser uma tarefa difícil, devido aos acentuados declives de alguns setores de arribas, assim como ao tipo de imagem que é obtida através dos ortofotomapas (vista aérea sobre o território). A identificação das áreas instabilizadas torna-se limitada, uma vez que a face da arriba pode ficar ocultada na imagem devido à perspetiva da fotografia ou à sombra causada pela própria arriba. Neste contexto, a realização de trabalho de campo torna-se fundamental ao permitir ultrapassar estes impedimentos, permitindo ainda a validação da eventual presença de movimentos de vertente através de indícios como a cicatriz do movimento e/ou topografia irregular do território, o que constitui uma mais-valia para o inventário. É ainda de referir que o trabalho de campo não está isento de dificuldades no que diz respeito à identificação de áreas instabilizadas, por exemplo, devido à cobertura do território por vegetação, às ações antrópicas que promovem a estabilização das arribas, aos efeitos da erosão hídrica e à ocorrência de novos movimentos de vertente, acontecimentos que vão ocultando os sinais de instabilidade.

O trabalho de campo foi realizado de forma sistemática e possibilitou a validação dos movimentos de vertente inicialmente inventariados, o aperfeiçoamento da sua delimitação detalhada e a classificação da tipologia de alguns movimentos de vertente que suscitavam dúvidas na foto-interpretação (Fig. 5.2).

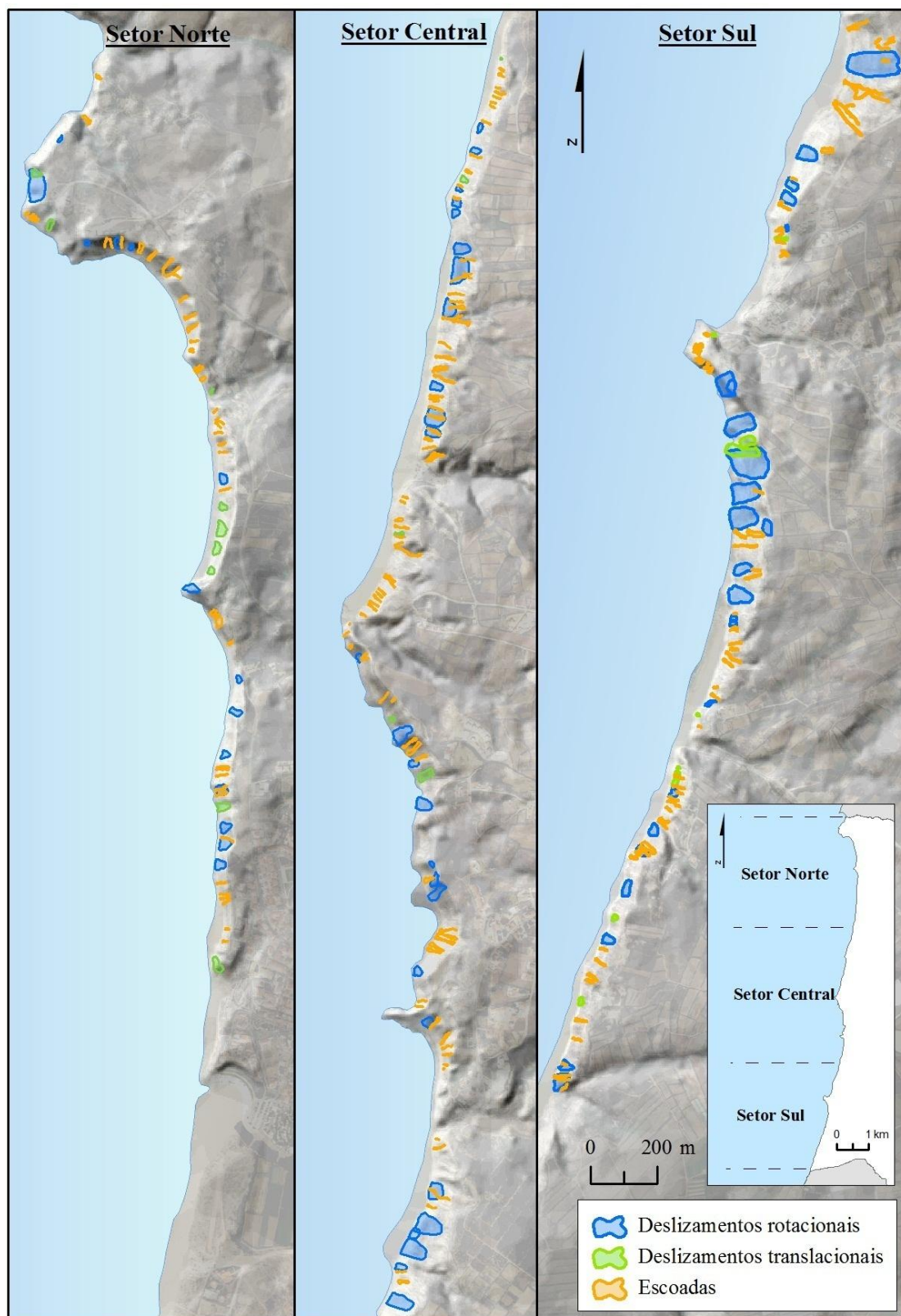




**Figura 5.2** - Movimentos de vertente identificados e validados através de trabalho de campo.  
A – Escoda na Peralta; B – Deslizamento translacional no Caniçal; C – Deslizamento rotacional em Paimogo; D – Deslizamento rotacional em Porto das Barcas.

Toda a informação adquirida no campo, registada sobre os ortofotomapas com a altimetria sobreposta numa base impressa à escala 1:4000, foi cruzada com a informação obtida a partir da fotointerpretação e posteriormente inserida em ambiente SIG através da vectorização dos movimentos de vertente com recurso à criação de *shapefiles* de polígonos (Fig. 5.3). Adicionalmente, os movimentos de vertente foram classificados quanto à sua tipologia, de acordo com os critérios de Varnes (1978), WP/WLI (1993b) e Dikau *et al.* (1996), considerando-se três tipologias de movimentos: deslizamentos rotacionais, deslizamentos translacionais e escoadas. Os desabamentos não foram incluídos neste estudo devido à dificuldade em serem inventariados, uma vez que o material instabilizado é rapidamente desagregado por ação do mar e em algumas áreas remobilizado por mecanismos de escoada. Quanto

aos balançamentos, não foi registada qualquer ocorrência desta tipologia de movimento na área em estudo.



**Figura 5.3** - Distribuição espacial dos movimentos de vertente identificados nas arribas do concelho da Lourinhã.

No total, foram inventariados 290 movimentos de vertente, subdivididos pelas três tipologias consideradas da seguinte forma (Quadro 5.1): 64 deslizamentos rotacionais (22,1% do total); 24 deslizamentos translacionais (8,3% do total); e 202 escoadas (69,6% do total). Num total de 141 957 m<sup>2</sup> de área instabilizada, os deslizamentos rotacionais são a tipologia de movimentos que representa maior área instabilizada (107 339 m<sup>2</sup> correspondentes a 72,7% da área total), seguindo-se as escoadas (26 502 m<sup>2</sup> correspondentes a 18,2% da área total) e por último os deslizamentos translacionais (13 227 m<sup>2</sup> correspondentes a 9,1% da área total) (Quadro 5.1). Devido à existência de movimentos de vertente sobrepostos no terreno (e.g. escoadas inseridas no corpo de deslizamentos rotacionais), o somatório das áreas dos movimentos de vertente não corresponde à área total instabilizada, sendo este último um valor inferior. Os deslizamentos rotacionais são os movimentos que apresentam maior dimensão individual, como é a atestado pela respetiva área média (1 677 m<sup>2</sup>). No polo oposto, encontram-se as escoadas, com dimensão média de 131 m<sup>2</sup> (Quadro 5.1).

**Quadro 5.1** - Características dos movimentos de vertente.

Tipologias	Eventos		Área instabilizada		Dimensões médias (m <sup>2</sup> )
	N	%	(m <sup>2</sup> )	%	
Deslizamentos rotacionais	64	22,1	107 339	72,7	1 677
Deslizamentos translacionais	24	8,3	13 227	9,1	551
Escoadas	202	69,6	26 502	18,2	131
Total	290	100,0	141 957	100,0	-

## 5.2 FATORES DE PREDISPOSIÇÃO DA INSTABILIDADE

A determinação dos fatores de predisposição associados à ocorrência de movimentos de vertente revela ser uma tarefa complexa uma vez que os fatores funcionam de forma combinada, num sistema que é tipicamente multivariado. O presente estudo considera fatores de predisposição que demonstram elevada relevância na temática da instabilidade de arribas e que simultaneamente apresentam um nível de detalhe aceitável à escala regional. Os fatores de predisposição (variáveis independentes) são

discriminados em dois grupos temáticos, que se distinguem também quanto às fontes de informação utilizadas para a obtenção dos temas cartográficos:

➤ Fatores morfométricos:

- Altura - corresponde à diferença de altitude entre a crista e a base da arriba;
- Declive máximo, Declive médio e Desvio-padrão do declive – o declive, considerado como o fator de predisposição de maior importância na ocorrência de movimentos de vertente (Mancini *et al.*, 2010), reproduz de forma direta, as tensões tangenciais que ocorrem nas arribas. A utilização dos três parâmetros pretende incorporar a existência de eventuais irregularidades da face da arriba;
- Curvatura em perfil e Curvatura em planta - a forma das vertentes influencia o sistema de drenagem local e a cinemática dos movimentos de vertente (Mancini *et al.*, 2010). A curvatura em perfil origina a aceleração e desaceleração do fluxo e a curvatura em planta afeta a convergência ou divergência do fluxo;
- Radiação solar potencial – é utilizada neste estudo como variável *proxy* da exposição das vertentes, com a grande vantagem de ser expressa numa escala quantitativa de razão. Com esta variável procura-se exprimir, indiretamente, a influência de fatores como a exposição aos ventos dominantes e à agitação marítima.

➤ Fatores geológicos:

- Unidades litológicas - correspondem aos materiais que constituem as arribas. A litologia pretende dar a indicação de variáveis fundamentais no sistema da instabilidade das vertentes, tais como a resistência ao corte, a permeabilidade e a propensão ao desgaste físico e químico dos materiais rochosos (Varnes, 1984);
- Estrutura geológica - corresponde à atitude do material sedimentar, traduzindo-se na orientação e inclinação das camadas. Este fator tem uma importância crucial, quando associado à exposição da face da arriba, na definição de superfícies de fragilidade que podem funcionar como planos de rutura.

Os fatores de predisposição de carácter morfométrico foram obtidos a partir da topografia do terreno, sob a forma de Modelo Digital de Terreno (MDT). Sendo esta a fonte de informação utilizada para a obtenção de algumas variáveis, adotaram-se métodos na elaboração do MDT de modo a assegurar a obtenção de um modelo fiável com uma resolução e precisão adequada à escala de trabalho. Recorrendo a um conjunto de pontos cotados e altimetria representada em curvas de nível com equidistância de 5 m, criou-se uma Rede Irregular de Triângulos (TIN – *Triangular Irregular Network*) através do método de interpolação. Na passagem da informação vetorial para matricial foram adotados pixéis de 5 m ( $25\text{ m}^2$ ) para a obtenção do mapa altimétrico, que posteriormente foi utilizado para derivar os temas de declives e da radiação solar potencial. No caso dos temas “Curvatura em perfil” e “Curvatura em planta” adotou-se um pixel de 10 m ( $100\text{ m}^2$ ) que reproduz melhor este tipo de morfologia do terreno. A altura da arriba foi extraída do mapa altimétrico (resultante do MDT) e os restantes seis mapas temáticos com origem no MDT foram extraídos dos mapas altimétricos com o auxílio do conjunto de ferramentas do *Spatial Analyst Tools* do ArcGIS 9.3.1.

Os dois mapas temáticos com informação geológica foram obtidos de formas diferentes: as unidades litológicas foram derivadas a partir da análise da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000 (Folha 30-A, Lourinhã) e respetiva notícia explicativa; a informação sobre a estrutura geológica foi obtida diretamente do trabalho de Neves (2004).

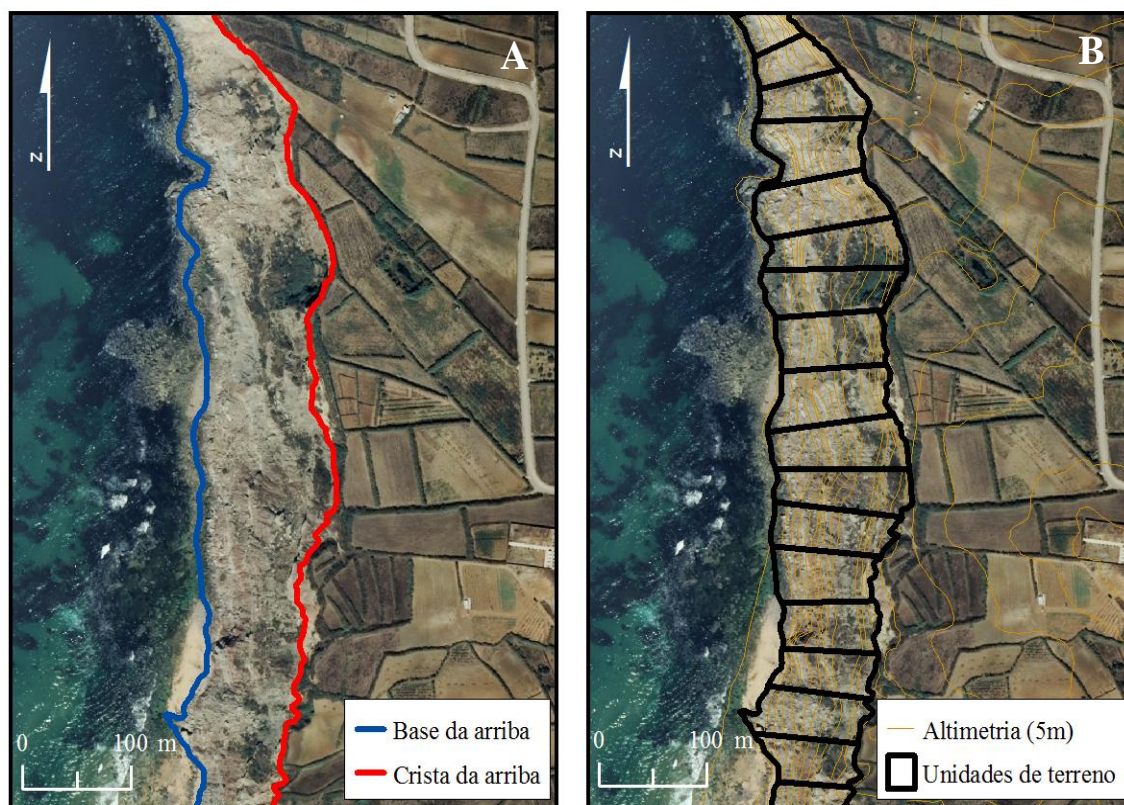
### 5.3 UNIDADES DE TERRENO

A integração dos dados utilizados para avaliar a suscetibilidade geomorfológica é efetuada através da adoção de uma tipologia de unidades terreno, crucial para a aplicação de métodos estatísticos. A seleção destas unidades deve ser efetuada de acordo com o fenómeno e as características do território em estudo, uma vez que estas influenciam o agrupamento dos dados de entrada do modelo, bem com os resultados finais. No caso do estudo de arribas costeiras, os fatores que condicionam a estabilidade da vertente devem ser considerados na sua globalidade, ou seja, ao longo



de toda a arriba, uma vez que todos os processos que ocorrem desde a base até à crista da arriba estão relacionados com a estabilidade da vertente (Marques *et al.*, 2011).

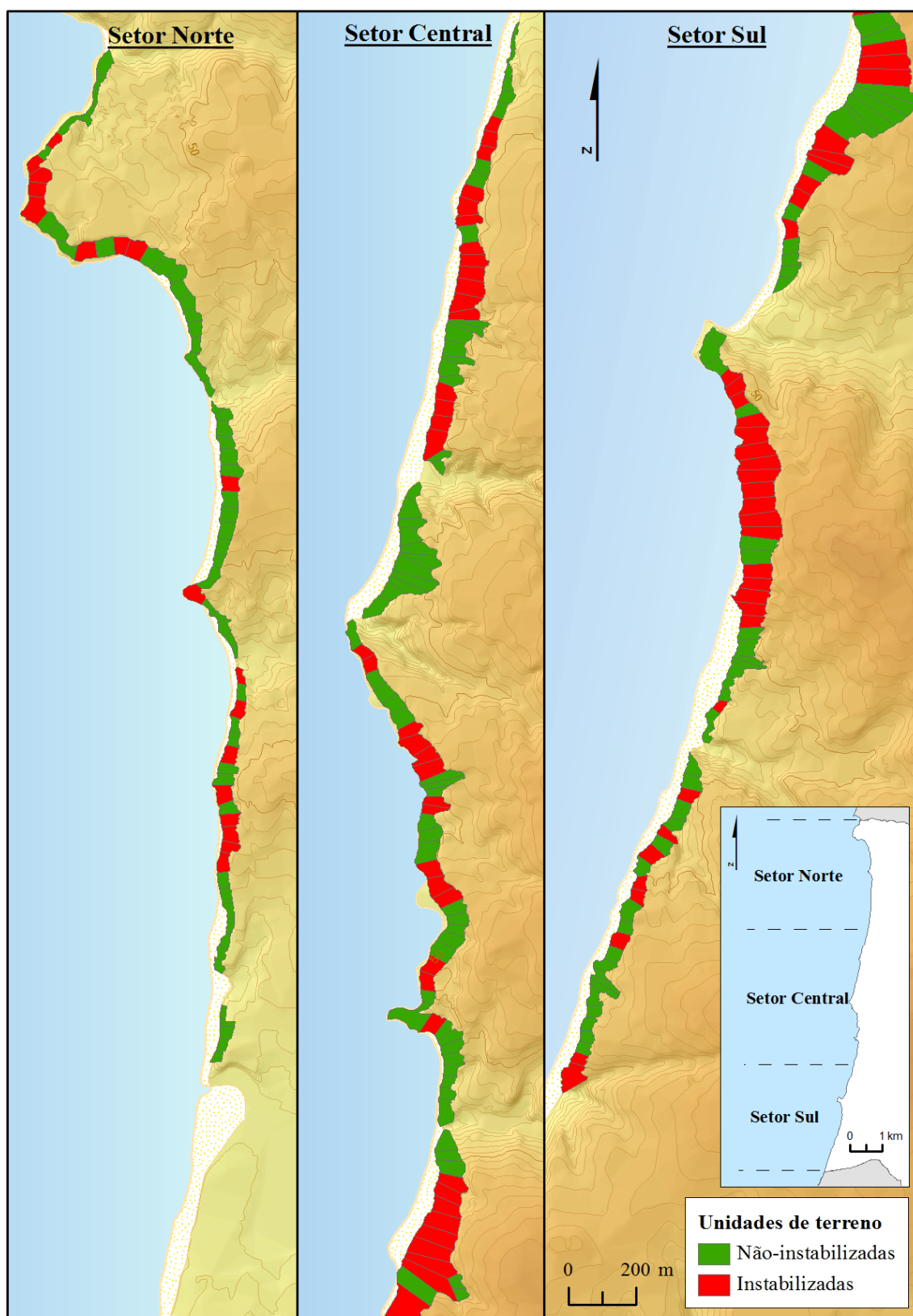
As unidades de terreno adotadas neste estudo baseiam-se na metodologia proposta por Marques *et al.* (2011), sendo estas definidas segundo um critério morfométrico e operacional. O processo de construção baseou-se na foto-interpretação dos ortofotomapas de 2007, através do qual foi delimitado o limite inferior e superior das unidades de terreno, correspondentes às linhas da base e da crista das arribas, respetivamente. Os limites laterais foram traçados geometricamente de modo perpendicular às curvas de nível da topografia, tendo sido definidos através da segmentação da linha da crista em troços de 50 m de largura (Fig. 5.4), com uma suavização máxima de 25 m, cuja finalidade é a eliminação de interferências irrelevantes para as unidades de terreno. No total, obtiveram-se 261 unidades de terreno (ver Anexo 1) com diferentes áreas de abrangência, variando entre 385 e 8 293 m<sup>2</sup>, com um valor médio de 2 525 m<sup>2</sup>.



**Figura 5.4** - Processo de construção das unidades de terreno. A- Delimitação da base e crista da arriba; B – Delimitação das unidades de terreno.

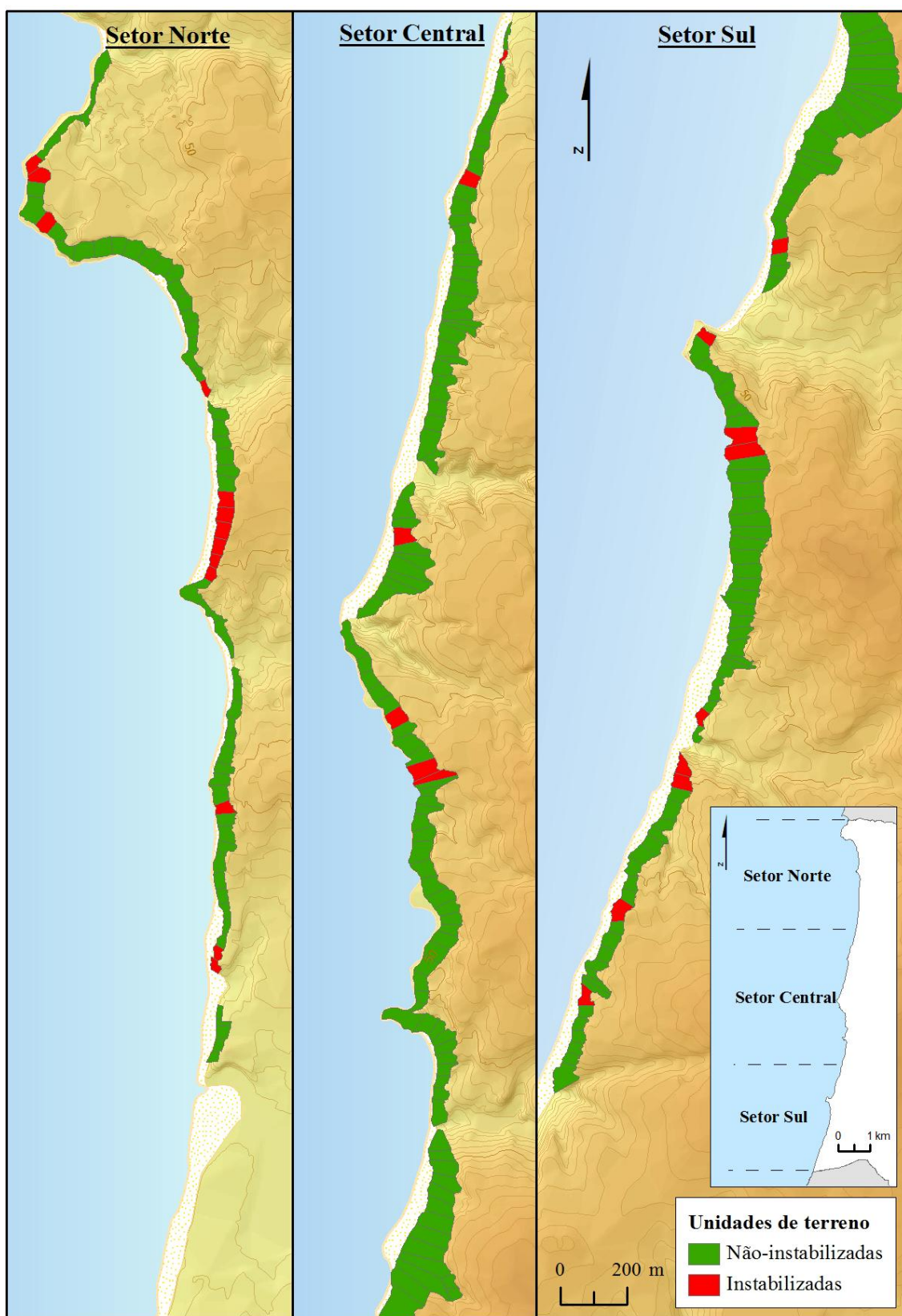
### **5.3.1 INTEGRAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE NAS UNIDADES DE TERRENO**

A inserção da informação referente aos movimentos de vertente (variável independente) no modelo de avaliação da suscetibilidade efetua-se através da classificação das unidades de terreno em duas classes: instabilizadas e não-instabilizadas. O processo de classificação tem por base a quantificação em percentagem de área instabilizada de cada unidade de terreno, tendo em consideração os tipos de movimento de vertente estudados, os quais diferem bastante em termos de dimensão individual, como o atestam as respetivas superfícies médias instabilizadas. Deste modo, para os deslizamentos rotacionais e translacionais consideraram-se unidades de terreno instabilizadas aquelas em que a área instabilizada ultrapassa 2% da área total da unidade de terreno. Para as escoadas e para o conjunto dos movimentos de vertente, o valor de referência reduziu-se a 0,5%. Deste processo resultaram 92 unidades de terreno instabilizadas por deslizamentos rotacionais (35,2% do número total de unidades de terreno; Figura 5.5), 28 unidades de terreno instabilizadas por deslizamentos translacionais (10,7% do número de total de unidades de terreno; Figura 5.6), 143 unidades de terreno instabilizadas por escoadas (54,8% número do total das unidades de terreno; Figura 5.7) e 209 unidades de terreno instabilizadas pelo conjunto de todas as tipologias de movimentos de vertente (80,1% do número total das unidades de terreno; Figura 5.8).

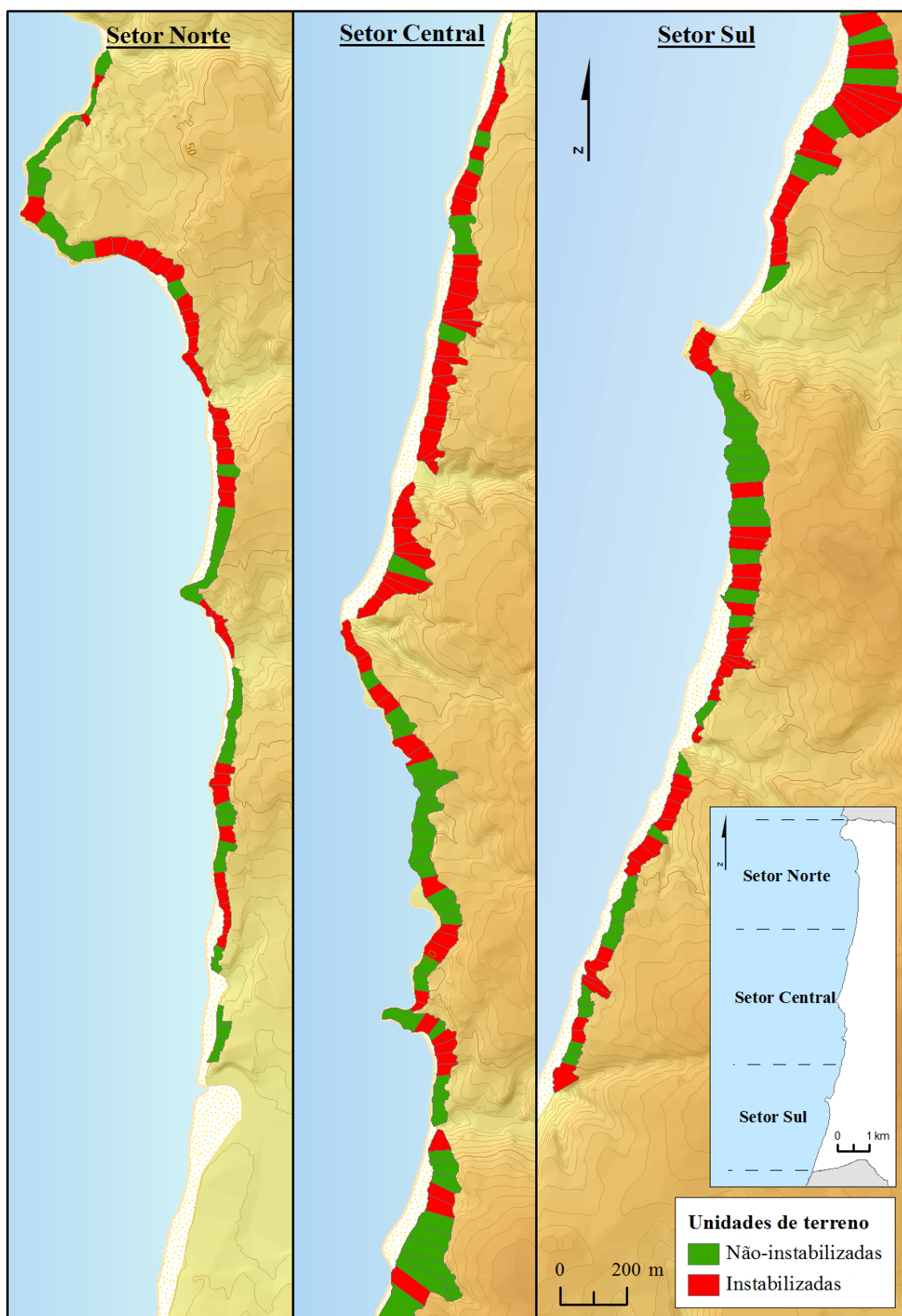


**Figura 5.5** - Classificação das unidades de terreno quanto à instabilidade geomorfológica provocada por deslizamentos rotacionais.

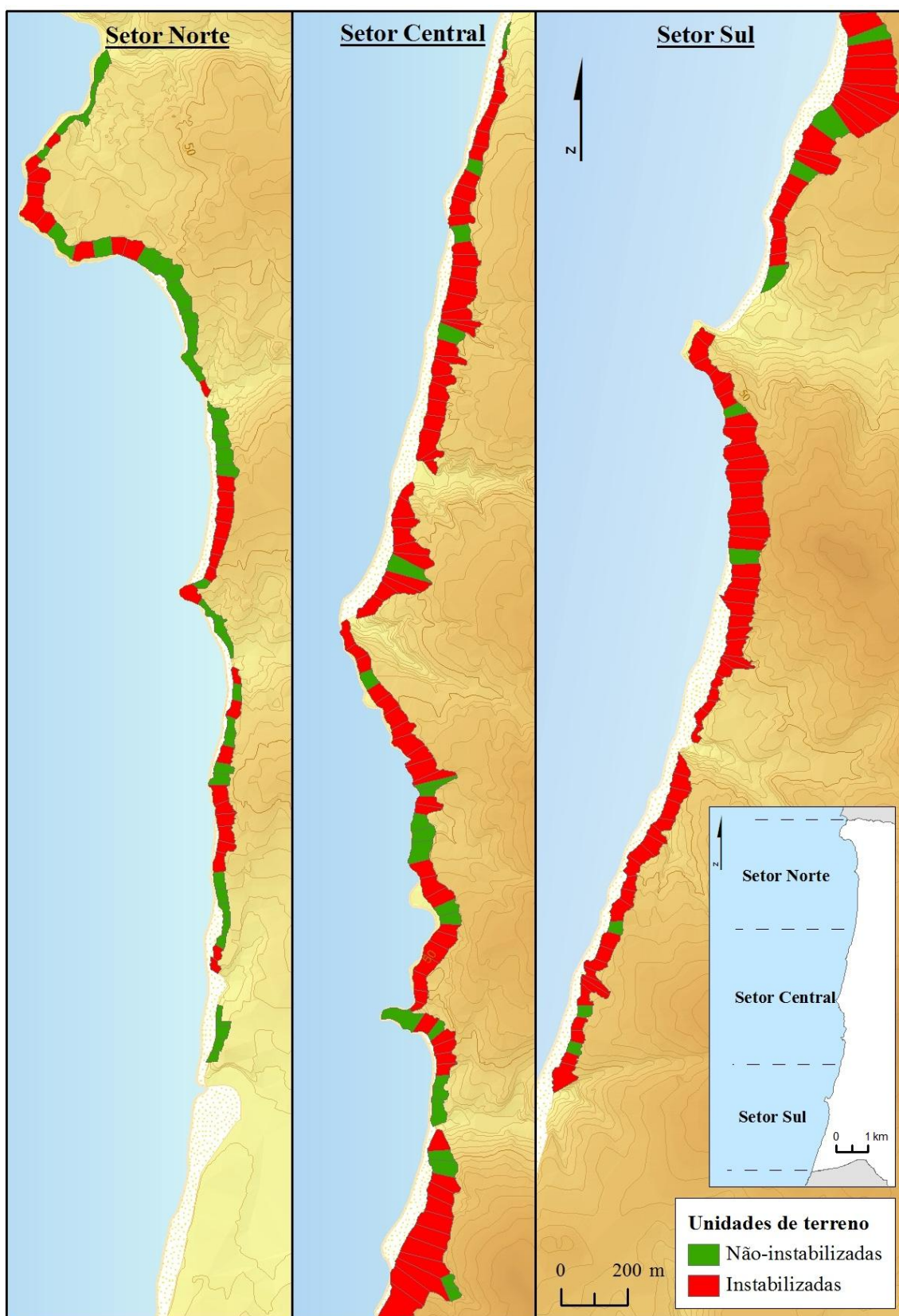




**Figura 5.6** - Classificação das unidades de terreno quanto à instabilidade geomorfológica provocada por deslizamentos translacionais.



**Figura 5.7** - Classificação das unidades de terreno quanto à instabilidade geomorfológica provocada por escoadas.



**Figura 5.8** - Classificação das unidades de terreno quanto à instabilidade geomorfológica provocada pelo conjunto de todas as tipologias de movimentos de vertente.

### 5.3.2 INTEGRAÇÃO DOS FATORES DE PREDISPOSIÇÃO NAS UNIDADES DE TERRENO

A integração dos dados referentes aos fatores de predisposição do tipo morfométrico é feita com o recurso à ferramenta *Zonal Statistics* do ArcGIS, com a finalidade de determinar o valor médio (e também o valor máximo e o desvio padrão no caso do declive) para cada unidade de terreno, de acordo com o mapa temático em formato matricial. Posteriormente, os resultados obtidos foram agrupados em classes, definidas de modo a obter um número equilibrado e comparável de unidades em cada classe, de modo a evitar efeitos de escala na análise da suscetibilidade. Deste modo, foram consideradas 6 classes para a altura da arriba, 7 classes para os declives (máximo, médio e desvio-padrão), 3 classes para as curvaturas em perfil e em planta e 5 classes para a radiação solar potencial (Quadro 5.2). Refira-se que, segundo Pereira (2009), o modo como a informação é agrupada em classes condiciona os resultados da suscetibilidade e este aspeto ainda não se encontra devidamente clarificado na literatura científica.

**Quadro 5.2** - Variáveis morfométricas, respetivas classes e sua distribuição nas unidades de terreno.

Variáveis	Classes	Códigos	Unidades de terreno
Altura (m)	< 30	ALT1	35
	30 - 40	ALT2	43
	40 - 50	ALT3	64
	50 - 60	ALT4	63
	60 - 70	ALT5	32
	≥ 70	ALT6	24
Declive médio (°)	< 25	DMD1	23
	25 - 30	DMD2	48
	30 - 32,5	DMD3	35
	32,5 - 35	DMD4	47
	35 - 40	DMD5	56
	40 - 45	DMD6	37
	≥ 45	DMD7	15

<b>Declive máximo (°)</b>	< 50	DMX1	23
	50 - 55	DMX2	43
	55 - 60	DMX3	69
	60 - 65	DMX4	52
	65 - 70	DMX5	37
	70 - 75	DMX6	29
	≥ 75	DMX7	8
<b>Desvio-padrão do declive (°)</b>	< 9	DPD1	34
	9 - 10,5	DPD2	48
	10,5 - 12	DPD3	35
	12 - 13,5	DPD4	33
	13,5 - 15	DPD5	37
	15 - 18	DPD6	42
	≥ 18	DPD7	32
<b>Curvatura em perfil</b>	Côncavo	CPF1	186
	Plano	CPF2	15
	Convexo	CPF3	60
<b>Curvatura em planta</b>	Convergente	CPT1	97
	Plano	CPT2	14
	Divergente	CPT3	150
<b>Radiação solar potencial (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	< 950	RSP1	47
	950 - 1025	RSP2	43
	1025 - 1100	RSP3	59
	1100 - 1175	RSP4	62
	≥ 1175	RSP5	50

Os fatores de origem geológica foram agrupados em classes respeitando a fonte de informação de onde foram extraídos. Foram consideradas 6 unidades litológicas e 3 classes no que respeita à estrutura geológica (Quadro 5.3).

**Quadro 5.3** - Variáveis de origem geológica, respetivas classes e sua distribuição nas unidades de terreno.

Variáveis	Classes	Código	Unidades de terreno
<b>Unidades litológicas</b>	Grés, margas e arenitos da Amoreira-Porto Novo	UL1	146
	Grés, margas, argilas e conglomerados do Bombarral	UL2	6
	Margas, argilas e grés do Sobral	UL3	25
	Grés, margas e arenitos da Amoreira-Porto Novo e	UL4	18
	Grés, margas, argilas e conglomerados do Bombarral		
	Grés, margas e arenitos da Amoreira-Porto Novo e	UL5	60
	Margas, argilas e grés do Sobral		
<b>Estrutura geológica</b>	Grés, margas, argilas e conglomerados do Bombarral e Margas, argilas e grés do Sobral	UL6	6
	Orientação sub-paralela à linha de costa com inclinação entre 0 e 5° para norte	EG1	161
	Orientação sub-paralela à linha de costa com inclinação entre 0 e 5° para sul	EG2	23
	Orientação sub-paralela à linha de costa com inclinação entre 5 e 15° para sul	EG3	77

## 5.4 MÉTODOS ESTATÍSTICOS

### 5.4.1 CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE

Os métodos estatísticos baseiam-se na relação espacial existente entre os movimentos de vertente e os fatores que condicionaram a ocorrência destes eventos no passado e no presente, da qual resulta uma função paramétrica empírica que permite a determinação quantificada da predição da suscetibilidade em todo o território (Zêzere, 1997, 2005). A utilização deste tipo de métodos possibilita a determinação do peso específico de cada variável na distribuição espacial das instabilidades registadas, de forma objetiva e quantificada, conferindo, assim, objetividade ao processo de avaliação da suscetibilidade (Zêzere, 2007; Lopes, 2008). Os métodos estatísticos podem ser subdivididos em métodos bivariados e multivariados. Na presente dissertação optou-se pela utilização de dois métodos estatísticos bastante aplicados na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente à escala regional: o método do Valor Informativo (e.g. Zêzere, 2002; Henriques, 2009; Meneses, 2011; Marques *et al.*,



2011; Piedade *et al.*, 2011; Guillard e Zêzere, 2012; Epifânio *et al.*, 2012); e o método da Regressão Logística (e.g. Atkinson e Massari, 1998; Guzzetti *et al.*, 1999; Gorsevski *et al.*, 2000; Suzen e Doyuran, 2003; Ayalew e Yamagishi, 2005; Chen e Wang, 2007; Carrara *et al.*, 2008; Mathew *et al.*, 2009; Van Den Eeckhaut e Poesen, 2010; Mancini *et al.*, 2010; Dahal *et al.*, 2012).

A capacidade preditiva dos modelos de suscetibilidade deve ser avaliada através da validação com novos movimentos de vertente “sob pena de serem considerados inúteis e inconsistentes do ponto de vista científico” (Pereira, 2009, p.228). Ao longo dos anos têm sido utilizadas diversos métodos que permitem avaliar o carácter preditivo dos mapas de suscetibilidade, recorrendo à comparação visual do modelo preditivo com o conjunto de movimentos de vertente utilizados para a sua construção, assim como com as “futuras” manifestações de instabilidade (Zêzere, 2005; Frattini *et al.*, 2010). Com a utilização de métodos de base estatística na produção de mapas de predição, torna-se possível efetuar a validação de forma rápida e eficiente. As curvas das taxas de sucesso e de predição e as curvas ROC (*Receiver Operator Characteristic*) são exemplos disso. As curvas das taxas de sucesso resultam do cruzamento dos mapas de suscetibilidade com os movimentos de vertente utilizando na elaboração do modelo. Já as curvas das taxas de predição resultam do cruzamento dos mapas de suscetibilidade com um conjunto de movimentos de vertente que não foram utilizados na elaboração do modelo de modo a prever futuras manifestações de instabilidade (Henriques, 2009). Por seu turno, as curvas ROC relacionam a taxa dos verdadeiros positivos (representada no eixo das ordenadas) com a taxa dos falsos positivos (representada no eixo das abscissas), correspondentes, respetivamente, ao número de unidades de terreno corretamente classificadas como instáveis e ao número de unidades de terreno classificadas como instáveis mas que na realidade estão estáveis (Frattini *et al.*, 2010; Pereira *et al.*, 2012). A curva ROC, introduzida por Swets (1988), tem sido utilizada por diversos autores (Yesilnacar e Topal, 2005; Beguería, 2006; Gorsevski *et al.*, 2006; Frattini *et al.*, 2008; Nefeslioglu *et al.*, 2008) na avaliação de modelos preditivos de suscetibilidade. As curvas ROC podem ser de sucesso ou de predição, consoante o carácter de independência do conjunto de movimentos de

vertente utilizado na validação do modelo, tal como acontece com as curvas das taxas de sucesso e de predição.

A validação dos modelos recorrendo a estas duas tipologias de curvas (taxas de sucesso/predição e ROC) produzem diferentes resultados. A curva da taxa de sucesso, que baseia-se na correspondência espacial entre os movimentos de vertente e o mapa de suscetibilidade, considerada a área instabilizada e área das unidades de terreno (Frattini *et al.*, 2010). Em relação à curva ROC, baseia-se na classificação estatística das unidades de terreno e descreve a capacidade estatística do modelo para discriminar as unidades instabilizadas e não instabilizadas, considerando apenas o número de unidades de terreno corretamente e incorretamente classificadas (Frattini *et al.*, 2010). Ao contrário do que acontece com as curvas de sucesso e predição, a curva ROC mas não tem uma leitura preditiva (Zêzere *et al.*, 2009).

A partição equitativa do conjunto de movimentos de vertente em dois grupos semelhantes é defendida por Chung e Fabbri (2003) como sendo a melhor abordagem para avaliar a capacidade preditiva do modelo de suscetibilidade, que consiste na utilização de um grupo para a produção da imagem preditiva e do outro grupo para a validação. Deste modo, este método necessita da criação de dois grupos de movimentos de vertente, que poderá ser realizada por: (i) partição temporal - segue um critério de idade, tendo como delimitação uma data estabelecida; (ii) partição espacial - segue um critério de localização, em que o modelo de predição aplicado à área de modelação é posteriormente exportado para a área de validação e confrontado com os movimentos da área de validação; e (iii) partição aleatória - dois grupos com dimensões semelhantes selecionados de forma aleatória.

Através das curvas, apenas é possível realizar uma comparação visual entre os modelos, tornando-se importante a realização de uma avaliação que quantifique globalmente o modelo preditivo. Esta avaliação é possível recorrendo à determinação das Áreas Abaixo da Curva (AAC) (Gorservski *et al.*, 2000):

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left( (Ls_i - L_i) * \frac{a_i + b_i}{2} \right) \quad [5.1]$$



Sendo:

$(Ls_i - L_i)$  – amplitude da classe;

$a_i$  – valor da ordenada correspondente a  $L_i$ ;

$b_i$  – valor da ordenada correspondente a  $Ls_i$ .

A AAC pode assumir, teoricamente, valores entre 0 e 1, que correspondem à capacidade preditiva mínima e máxima, respetivamente. Quanto mais próximo do valor 1, maior o ajuste do modelo preditivo, e necessariamente, melhor a sua qualidade. O valor de 0,5 indica o mínimo de elegibilidade do modelo preditivo (Mancini *et al.*, 2010).

Na presente dissertação opta-se pela validação dos modelos preditivos a partir de curvas ROC de predição acompanhadas pelo cálculo das AAC. Tratando-se de curvas ROC de predição, o inventário foi dividido em duas partes, tendo-se adotado a partição aleatória, uma vez que se desconhece a idade da generalidade dos movimentos de vertente. O método considera que alguns dos movimentos de vertente ainda não ocorreram no território em estudo. Segundo Pereira (2009), na utilização desta metodologia deve-se garantir que ambos os grupos de movimentos de vertente apresentam uma distribuição espacial semelhante. O desempenho do modelo revela ser tanto melhor, quanto maior o aumento da taxa dos verdadeiros positivos face aos falsos positivos, sendo em comparação com outra curva, tanto melhor quanto maior a proximidade com o canto superior esquerdo do gráfico (Carrara *et al.*, 1992; Frattini *et al.*, 2010).

#### **5.4.2 MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO**

O Método do Valor Informativo (*Information Value Method*) é um método estatístico bivariado, introduzido por Yan (1988) e Yin e Yan (1988) na temática da avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente.

Este método, considerado por Yan (1988) como um simples, generalista e indicado para a predição espacial de média escala, pressupõe a definição prévia de unidades de terreno e a análise de um conjunto de fatores de predisposição inerentes à ocorrência

de movimentos de vertente (Zêzere, 2001b). O Valor Informativo recorre a um sistema de pontuações com base na relação entre cada classe de cada variável introduzida no modelo e a distribuição dos movimentos de vertente, ou seja, na densidade de movimentos de vertente em cada classe de cada variável. Quantitativamente, o Valor Informativo é obtido de acordo com a expressão (Yin e Yan, 1988):

$$I_i = \log \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad [5.2]$$

Sendo:

$I_i$  – Valor Informativo da variável  $x_i$ ;

$S_i$  – número de unidades de terreno com a presença de movimentos de vertente de tipo  $y$  em simultâneo com a variável  $x_i$ ;

$N_i$  – número de unidades de terreno com a presença da variável  $x_i$ ;

$S$  – número total de unidades de terreno com movimentos de vertente de tipo  $y$ ;

$N$  – número total de unidades de terreno.

Segundo Yan (1988), os valores de  $I_i$  positivos indicam a existência de uma relação entre a variável em análise e a presença de movimentos de vertente, sendo esta tanto mais acentuada quanto maior for o *score* do Valor Informativo. Quando os valores de  $I_i$  são negativos, considera-se que a variável em análise é contrária à ocorrência de instabilidades. Valores de  $I_i$  próximo de zero indicam que a variável não é relevante no desenvolvimento de movimentos de vertente.

O Valor Informativo total de uma unidade de terreno  $j$ , que permite a elaboração da cartografia de suscetibilidade, é obtido pela seguinte fórmula (Yin e Yan, 1988):

$$I_j = \sum_{i=1}^n X_{ji} I_i \quad [5.3]$$

Sendo:

$I_j$  – Valor Informativo da unidade de terreno  $j$ ;

$X_{ji}$  – 1 ou 0, consoante a variável  $i$  esteja ou não presente na unidade de terreno  $j$ , respetivamente;

$I_i$  – Valor Informativo da variável  $x_i$ .

A suscetibilidade das unidades de terreno à ocorrência de determinada tipologia de movimentos de vertente varia, assim, em função do respetivo Valor Informativo total. As unidades de terreno que não tenham sido afetadas por movimentos de vertente são também pontuadas permitindo, deste modo, quantificar a suscetibilidade de toda a área em estudo de forma objetiva.

À semelhança dos restantes métodos bivariados, o Valor Informativo relaciona isoladamente cada classe de cada tema independente com a distribuição dos movimentos de vertente (Zêzere, 2002). De acordo com o mesmo autor (Zêzere, 2002), esta poderá ser a lacuna mais significativa do método do Valor Informativo, ao não considerar a relação entre as variáveis independentes, nomeadamente a sua eventual covariância.

As componentes que integram a equação [5.2] do método do Valor Informativo ( $N_i$ ,  $S_i$ ,  $N$  e  $S$ ) são obtidas a partir do *software* ArcGIS através dos mapas temáticos, subdivididos em classes, e das tabulações efetuadas com os diferentes grupos de movimentos de vertente. Procedeu-se à inserção manual destes valores em folhas de cálculo do Excel, tendo-se posteriormente calculado o Valor Informativo para cada classe de cada variável. Nas classes em que não existe registo de instabilidades de vertente, não foi possível aplicar, diretamente, o método do Valor Informativo devido à impossibilidade de calcular o logaritmo do valor 0, que deriva do numerador ( $S_i/N_i$ ) igual a 0. Nestes casos, averiguou-se o *score* mais reduzida presente nas restantes classes da mesma variável, e atribuiu-se esse valor com uma redução de uma décima. O Quadro 5.4 apresenta os Valores Informativos para cada classe de cada variável e para cada tipo de movimento de vertente considerado.

**Quadro 5.4** - Valores Informativos obtidos para as classes dos fatores de predisposição para as três tipologias de movimentos de vertente consideradas.

Variáveis	Classes	Códigos	Valor Informativo		
			Deslizamentos rotacionais	Deslizamentos translacionais	Escoadas
Altura (m)	< 30	ALT1	-0,497*	-0,165	-0,012
	30 - 40	ALT2	-0,397	-0,065	0,088
	40 - 50	ALT3	0,051	0,056	0,100
	50 - 60	ALT4	0,117	-0,231	0,028
	60 - 70	ALT5	0,153	0,292	-0,338
	> 70	ALT6	0,345	-0,331*	-0,072
Declive médio (°)	< 25	DMD1	-0,330	-0,115	0,053
	25 - 30	DMD2	-0,029	-0,115	0,023
	30 - 32,5	DMD3	0,162	-0,245	-0,444
	32,5 - 35	DMD4	0,080	0,195	0,148
	35 - 40	DMD5	0,086	-0,193	0,131
	40 - 45	DMD6	-0,029	0,016	-0,357
	> 45	DMD7	-0,430*	-0,084	-0,457
Declive máximo (°)	< 50	DMX1	-0,352	0,186	0,075
	50 - 55	DMX2	-0,120	-0,377	0,023
	55 - 60	DMX3	0,035	0,023	0,092
	60 - 65	DMX4	0,109	-0,435	0,011
	65 - 70	DMX5	0,133	-0,009	-0,148
	70 - 75	DMX6	-0,391	0,343	-0,095
	> 75	DMX7	0,302	0,401	-0,482
Desvio-padrão do declive (°)	< 9	DPD1	0,033	0,317	0,137
	9 - 10,5	DPD2	0,011	-0,426	0,154
	10,5 - 12	DPD3	0,193	-0,526*	0,054
	12 - 13,5	DPD4	-0,029	0,085	0,033
	13,5 - 15	DPD5	-0,220	-0,009	0,053
	15 - 18	DPD6	0,056	0,133	-0,069
	> 18	DPD7	-0,175	0,277	-0,374
Curvatura em perfil	Côncavo	CPF1	0,011	0,045	-0,013
	Plano	CPF2	-0,140*	-0,354	0,000
	Convexo	CPF3	0,021	-0,040	0,100
Curvatura em planta	Convergente	CPT1	0,068	-0,254	0,023
	Plano	CPT2	-0,372	0,100	-0,278
	Divergente	CPT3	-0,026	0,107	0,003

<b>Radiação solar (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	< 950	RSP1	-0,165	0,236	-0,069
	950 - 1025	RSP2	-0,096	-0,076	0,217
	1025 - 1100	RSP3	0,135	-0,032	0,110
	1100 - 1175	RSP4	0,112	-0,231	-0,105
	> 1175	RSP5	-0,129	0,052	0,144
<b>Unidades litológicas</b>	J <sup>3</sup> <sub>AP</sub>	UL1	0,034	-0,285	-0,091
	J <sup>3</sup> <sub>BO</sub>	UL2	-0,029	0,493	0,120
	J <sup>3</sup> <sub>SO</sub>	UL3	-0,138	-0,040	0,208
	J <sup>3</sup> <sub>AP</sub> - J <sup>3</sup> <sub>BO</sub>	UL4	0,369	-0,385*	-0,191*
	J <sup>3</sup> <sub>AP</sub> - J <sup>3</sup> <sub>SO</sub>	UL5	0,050	-0,385*	-0,191*
	J <sup>3</sup> <sub>BO</sub> - J <sup>3</sup> <sub>SO</sub>	UL6	-0,238*	-0,140	0,108
<b>Estrutura geológica</b>	0 a 5° - Norte	EG1	0,107	-0,239	0,029
	0 a 5° - Sul	EG2	-0,154	-0,096	0,094
	5 a 15° - Sul	EG3	-0,253	0,292	-0,431

\* - VI que não foi obtido através da equação [5.2].

Recorrendo ao Quadro 5.4, pode-se inferir sobre a relação espacial de cada classe das variáveis com a ocorrência de cada tipologia de movimentos de vertente. Verifica-se que os deslizamentos rotacionais apresentam maior relação espacial com arribas cuja altura é superior a 60 m (ALT5 e ALT6), com declives médios entre 30 e 32,5° (DMD3), declives máximos superiores a 75° (DMX7) e em arribas simultaneamente talhadas em Grés, margas e arenitos da Praia da Amoreira-Porto Novo e Grés, margas, argilas e conglomerados do Bombarral (UL4), cuja face da arriba apresenta declives relativamente regulares (DPD3). Os deslizamentos translacionais ocorrem preferencialmente em arribas de altura compreendida entre os 60 e 70 m (ALT5), em declives médios entre 32,5 e 35° (DMD4), declives máximos inferiores a 50° (DMX1) e superiores a 70° (DMX6 e DMX7) e reduzidas (DPD1) e elevadas (DPD7) variações do declive, expostas a uma radiação solar potencial anual inferior a 950 kWh/m<sup>2</sup> (RSP1) e talhadas em Grés, margas, argilas e conglomerados do Bombarral (UL2) com uma orientação sub-paralela à linha de costa com inclinação que varia entre os 5 e 15° para sul (EG3). Por último, as escoadas localizam-se predominantemente em arribas com declives médios que variam entre os 32,5 e 35° (DMD4), declives cuja variação é considerada baixa (DPD2), com uma exposição à radiação solar potencial anual considerada reduzida (RSP2), e sobre os afloramentos de margas, argilas e grés do Sobral (UL3).

Nas folhas de cálculo anteriormente referidas, que continham para cada unidade de terreno as classes correspondentes de cada variável independente, foram introduzidos, manualmente, os Valores Informativos em lugar destas. Assim, os Valores Informativos referentes à mesma unidade de terreno ficaram todos dispostos na mesma linha, facilitando a soma, e por conseguinte, a determinação do Valor Informativo total da unidade de terreno.

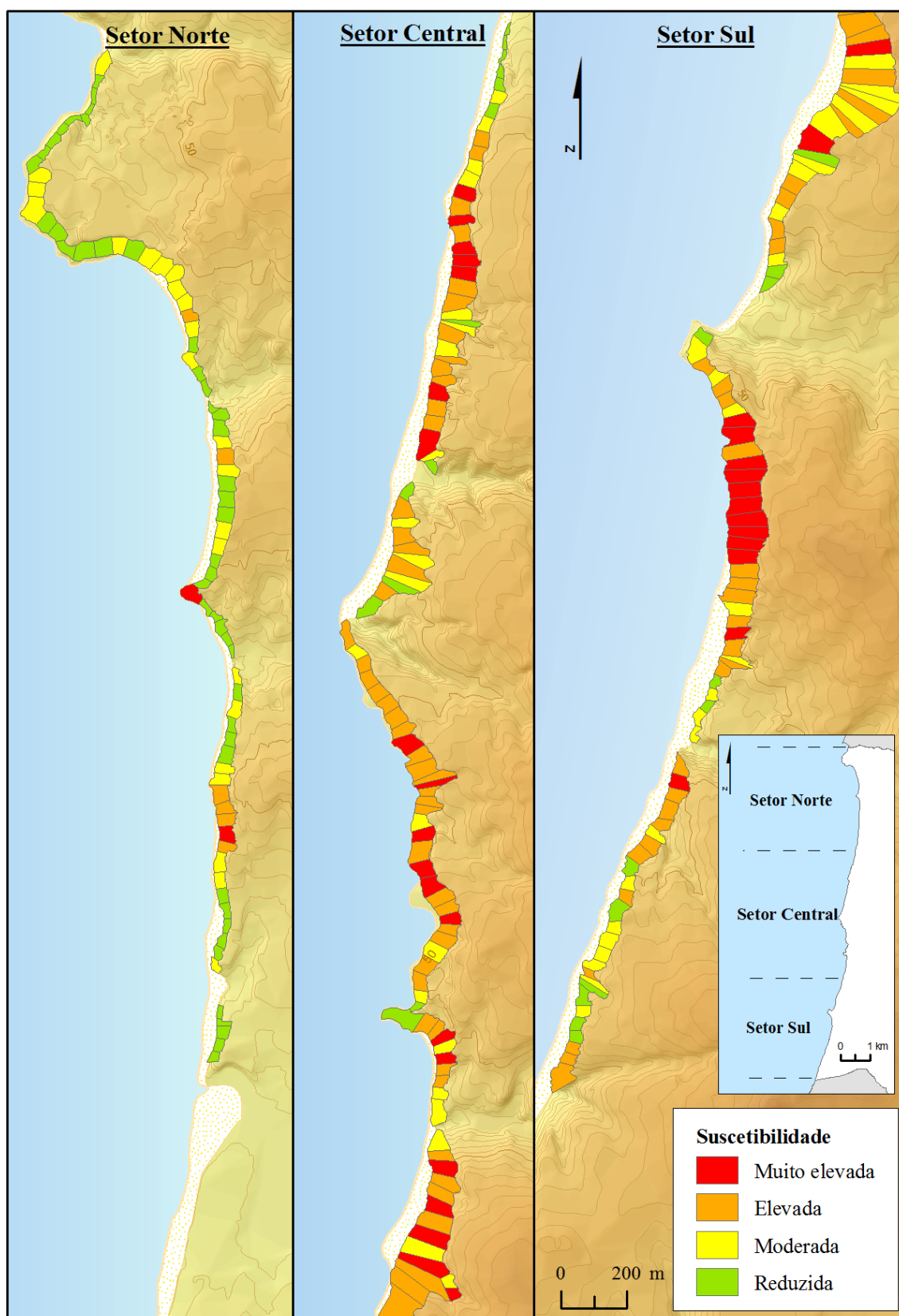
O Valor Informativo, tal como foi referido anteriormente, permite inferir sobre a probabilidade espacial de ocorrência de movimentos de vertente: os *scores* mais elevados indicam maior possibilidade de ocorrência de instabilidades de vertente; e os *scores* mais reduzidos indicam menor possibilidade de ocorrerem movimentos de vertente. Os valores foram exportados para o ArcGIS, classificados em quatro classes de suscetibilidade, de forma ajustada à gama dos Valores Informativos para as três tipologias de movimentos (Quadro 5.5).

**Quadro 5.5** - Classificação da suscetibilidade aos três tipos de movimentos de vertente de acordo com o método do Valor Informativo.

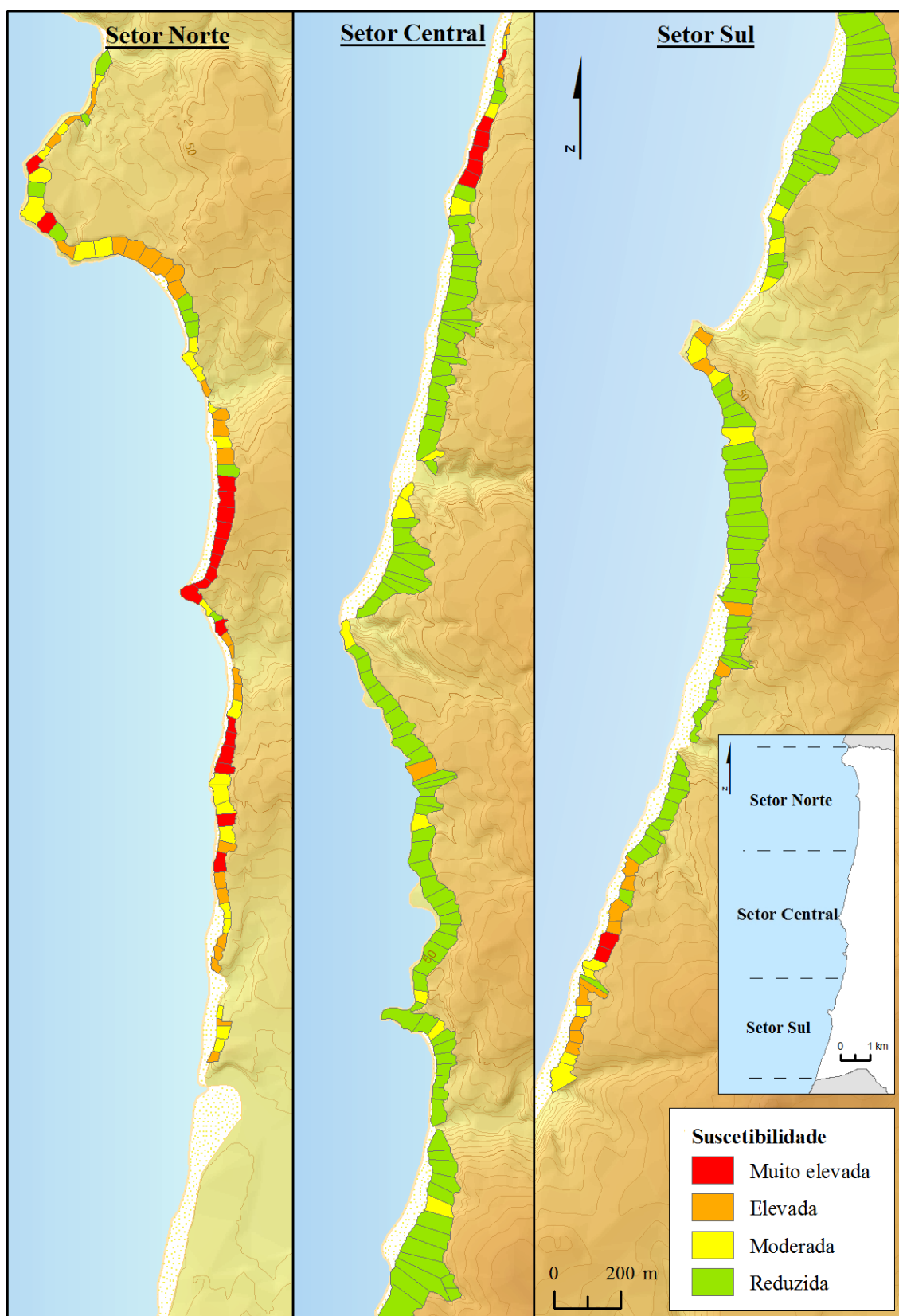
Suscetibilidade (classes qualitativas)	Scores do VI	Unidades de Terreno (N)		
		Deslizamentos rotacionais	Deslizamentos translacionais	Escoadas
<b>Muito elevada</b>	≥ 0,5	36	26	19
<b>Elevada</b>	0,0 – 0,5	85	43	96
<b>Moderada</b>	-0,5 – 0,0	69	45	91
<b>Reduzida</b>	< -0,5	71	147	55

O Quadro 5.5 permite constatar que o território é mais suscetível à ocorrência de deslizamentos rotacionais (36 classes “Muito elevada” e 85 classes “Elevada”) e menos suscetível aos deslizamentos translacionais (147 classes “Reduzida” e 45 classes “Moderada”).

Os mapas de suscetibilidade referentes aos deslizamentos rotacionais, deslizamentos translacionais e escoadas encontram-se representados nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11, respetivamente.

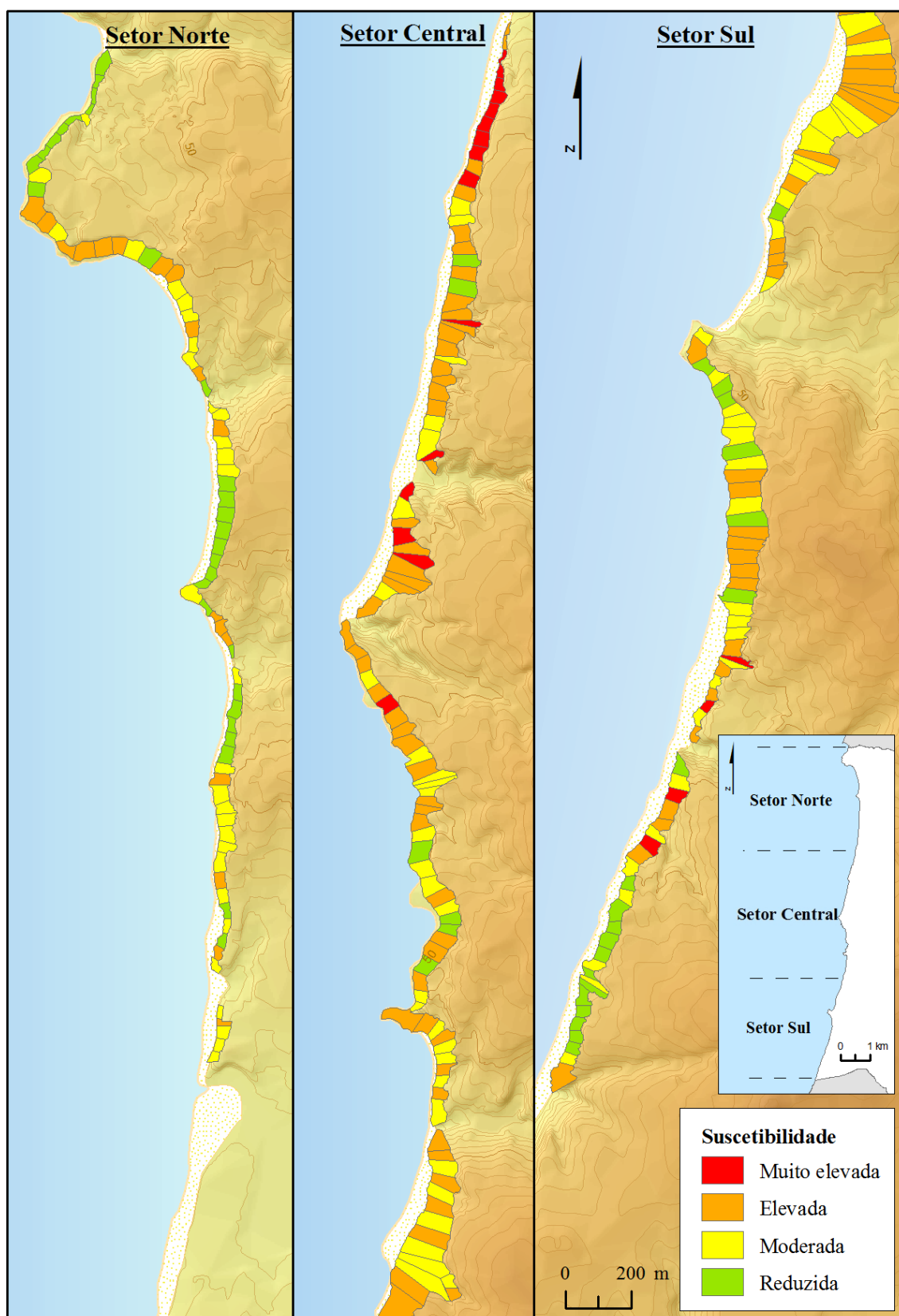


**Figura 5.9** - Mapa de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos rotacionais segundo o método do Valor Informativo.



**Figura 5.10** - Mapa de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais segundo o método do Valor Informativo.

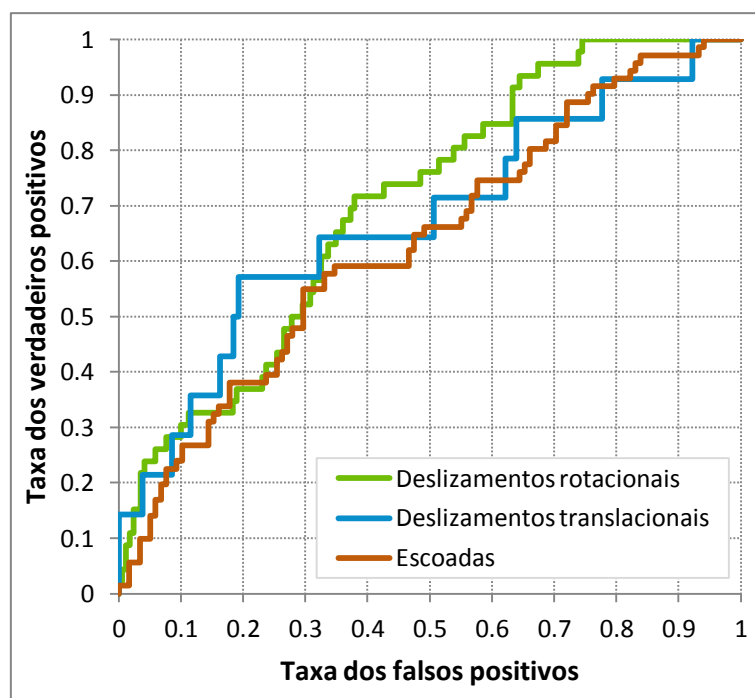




**Figura 5.11** - Mapa de suscetibilidade à ocorrência de escoadas segundo o método do Valor Informativo.

A suscetibilidade das arribas do concelho é bastante variável consoante a tipologia de movimentos considerados. No caso dos deslizamentos rotacionais observam-se os valores de suscetibilidade mais elevados (classes “Elevada” e “Muito elevada”) nos setores Central e Sul, com maior incidência ao longo da localidade de Porto das Barcas, setor sul de Porto Dinheiro e na Praia da Peralta, coincidentes na sua maioria com as classes dos fatores de predisposição UL1, UL4, EG1, ALT4, ALT5 e ALT6. O território mais suscetível à ocorrência de deslizamentos translacionais situa-se ao longo do Setor Norte (destaque para a Praia do Caniçal e região a Norte da localidade da Praia da Areia Branca) e em alguns troços das arribas nas Praias do Areal e Valmitão (zona Sul), locais onde se verifica a presença das classes EG3, DMX6, DMX7, RSP1 e ALT6. De forma global, verifica-se que os locais mais suscetíveis aos deslizamentos rotacionais correspondem aos locais menos suscetíveis à ocorrência de deslizamentos translacionais, e vice-versa. Relativamente às escoadas, salienta-se o Setor Central como parte do território mais suscetível, embora de forma geral também os restantes setores apresentem consideráveis áreas de suscetibilidade “Elevada”. A nível local, destacam-se as Praias do Areal e Peralta e a área a Norte de Porto das Barcas por serem consideradas áreas suscetíveis, coincidindo maioritariamente com as classes UL2, UL3, DPD1 e DPD2.

As curvas ROC de predição (Fig. 5.12), que permitem avaliar visualmente o ajustamento dos modelos de suscetibilidade às áreas instabilizadas, indicam que o modelo referente aos deslizamentos rotacionais é o que apresentam maior ajustamento, contrariamente ao que se verifica com o modelo de suscetibilidade das escoadas. As correspondentes AAC de 0,703 e 0,635, respetivamente, comprovam tais constatações. Relativamente aos deslizamentos translacionais, regista-se uma AAC de 0,674. Embora seja valores relativamente baixos, são aceitáveis do ponto de vista da modelação, tanto que mais que foram obtidas com uma amostra independente de unidades de terreno instabilizadas.



**Figura 5.12** - Curvas ROC de predição dos modelos de suscetibilidade produzidos pelo método do Valor Informativo para diferentes tipologias de movimentos de vertente.

### 5.4.3 MÉTODO DA REGRESSÃO LOGÍSTICA

A Regressão Logística (*Logistic Regression*) é um método estatístico multivariado introduzido por Cox (1958), que tem sido utilizado em diversos domínios por revelar-se útil e adequado na análise de problemas que implicam uma variável dependente dicotómica determinada por fatores independentes (Menard, 1995 *in* Can *et al.*, 2005, Bergonse e Bidarra, 2010; Pradhan, 2010). Segundo Mancini *et al.* (2010), a Regressão Logística tem demonstrado ser uma das abordagens mais confiáveis na avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente.

Este método permite analisar a relação entre uma variável dependente dicotómica e um conjunto de variáveis independentes que podem ser contínuas e/ou categóricas (Marques *et al.*, 2007). Pressupõe que as unidades de terreno instabilizadas e não instabilizadas seja numericamente equilibradas e que as variáveis independentes apresentem uma distribuição normal (Carrara *et al.*, 1999 *in* Zêzere, 2007).

A probabilidade de ocorrência de movimentos de vertente pode ser obtida a partir da equação (Mancini *et al.*, 2010):

$$P = \frac{1}{1 + e^{-Z}} \quad [5.4]$$

Sendo:

$P$  – probabilidade da unidade de terreno pertencer ao grupo estável ou instável;

$Z$  – combinação linear dada pela equação [5.5]:

$$Z = \beta_0 + \beta_1 V_1(r) + \beta_2 V_2(r) + \dots + \beta_n V_n(r) + \varepsilon \quad [5.5]$$

Sendo:

$\beta_i$  – parâmetros do modelo de regressão logística;

$V_i(r)$  – variáveis independentes em cada unidade de terreno;

$\varepsilon$  – erro associado à aproximação curvilínea do modelo.

Os parâmetros  $\beta$  são determinados de acordo com as variáveis independentes e variável dependente através do método de máxima verosimilhança (Gorsevski *et al.*, 2006; Ramani *et al.*, 2011).

A possibilidade de interpretar o resultado como uma probabilidade deve-se aos valores estarem limitados entre 0 e 1 (escala fechada), correspondendo à probabilidade mínima e máxima de ocorrência de movimentos de vertente na unidade de terreno, respetivamente (Kleinbaum, 1999 *in* Henriques, 2009). A probabilidade obtida pela equação [5.5] cinge-se, apenas, à ocorrência espacial de movimentos de vertente, uma vez que a dimensão temporal não é considerada (Dai e Lee, 2002; Henriques, 2009).

As variáveis utilizadas no método da Regressão Logística são as mesmas que foram usadas no método do Valor Informativo, com a exceção da variável “Estrutura geológica”, que foi retirada por interferir negativamente com as restantes variáveis. Os dados das variáveis independentes foram utilizados na forma de valores absolutos na Regressão Logística, não tendo sido reclassificadas como aconteceu no método do Valor Informativo. O tema “Unidades Litológicas” foi estudado sob a forma de três novas variáveis: Grés, margas e arenitos da Amoreira-Porto Novo (UL-GMA), Grés, margas, argilas e conglomerados do Bombarral (UL-GMAC), e Margas, argilas e grés do Sobral (UL-MAG). Determinou-se a percentagem de cada classe em cada unidade de terreno, e posteriormente, cada variável foi definida como 0 ou 1, indicando a ausência ou presença da classe como dominante, respetivamente. Todas as variáveis utilizadas neste método são variáveis numéricas (ou discretas).

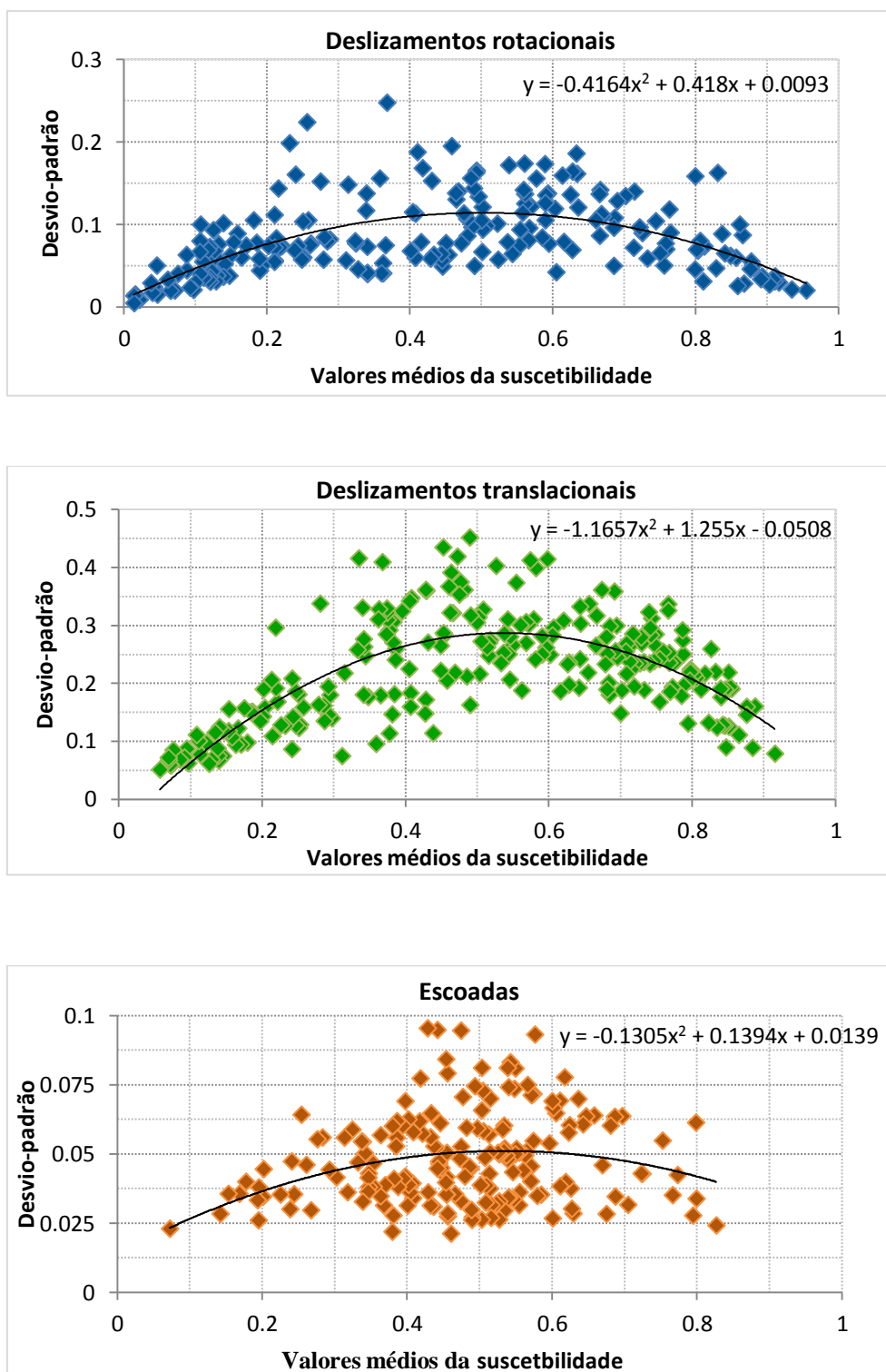
Numa primeira fase recorreu-se ao *software* SPSS 20.0 para reduzir a influência dos valores muito reduzidos e muito elevados das variáveis independentes. Para tal, utilizou-se o módulo *Descriptive Statistics* que permitiu efetuar uma standardização (ou padronização) dos dados por intermédio do método Z-Scores, que baseia-se na média e no desvio padrão do conjunto de entrada e devolve um conjunto de valores com média de 0 e desvio-padrão de 1. Posteriormente, estes dados foram exportados para o Excel onde foram criados, aleatoriamente, 10 grupos com unidades de terreno onde não ocorrem movimentos de vertente. O número de unidades de terreno selecionadas variou em função do número de unidades de terreno instabilizadas por tipologia de movimentos, uma vez que se pretendia criar dois grupos com igual número de elementos: um com unidades de terreno instabilizadas e outro sem unidades de terreno instabilizadas. Cada um dos 10 grupos foi agregado ao único grupo de unidades instabilizadas e foram novamente exportados para o *software* SPSS com o objetivo de determinar-se os coeficientes da regressão logística para cada variável e por tipologia de movimento de vertente, tendo-se posteriormente determinado a respetiva média e desvio-padrão dos 10 ensaios (Quadro 5.6).

**Quadro 5.6** - Coeficientes da Regressão Logística obtidos para as variáveis independentes para as três tipologias de movimentos de vertente consideradas.

Variáveis	Códigos	Coeficientes da Regressão Logística					
		Deslizamentos rotacionais		Deslizamentos translacionais		Escoadas	
		Média	$\sigma$	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$
<b>Altura</b>	ALT	1,24	0,23	-0,71	0,40	-0,13	0,07
<b>Declive médio</b>	DMD	-0,62	0,17	0,70	0,70	-0,04	0,13
<b>Declive máximo</b>	DMX	1,02	0,21	0,02	0,76	0,35	0,13
<b>Desvio-padrão do declive</b>	DPD	-0,30	0,22	0,55	0,68	-0,78	0,11
<b>Curvatura em perfil</b>	CPF	0,45	0,31	0,49	0,83	-0,14	0,06
<b>Curvatura em planta</b>	CPT	0,44	0,16	-0,02	0,46	-0,02	0,08
<b>Radiação solar potencial</b>	RSP	0,18	0,18	0,63	0,59	0,27	0,11
<b>Unidade litológica <math>J^3_{AP}</math></b>	UL-GMA	-0,78	0,25	-3,52	4,67	0,04	0,14
<b>Unidade litológica <math>J^3_{BO}</math></b>	UL-GMAC	-	-	-	-	-	-
<b>Unidade litológica <math>J^3_{SO}</math></b>	UL-MAG	-0,53	0,29	-2,72	4,26	0,20	0,10

No caso da Unidade Litológica UL-GMAC não foram obtidos coeficientes de regressão logística, e consequentemente desvios-padrão, porque o *software* SPSS ao considerar o comportamento (presença/ausência) das outras duas Unidades Litológicas, deduz o comportamento desta variável em função das anteriores, acabando por não indicar um coeficiente de regressão para esta variável.

Em Excel, aplicaram-se os coeficientes de acordo com as equações da combinação linear e regressão logística e determinou-se a média e desvio-padrão dos valores de suscetibilidade obtidos nos 10 ensaios efetuados para cada unidade de terreno (Fig. 5.13) (ver Anexo 2).



**Figura 5.13** – Distribuição dos valores médios de suscetibilidade para cada unidade de terreno face ao respetivo desvio-padrão, com respetivas curvas e equações polinomiais de 2º grau.

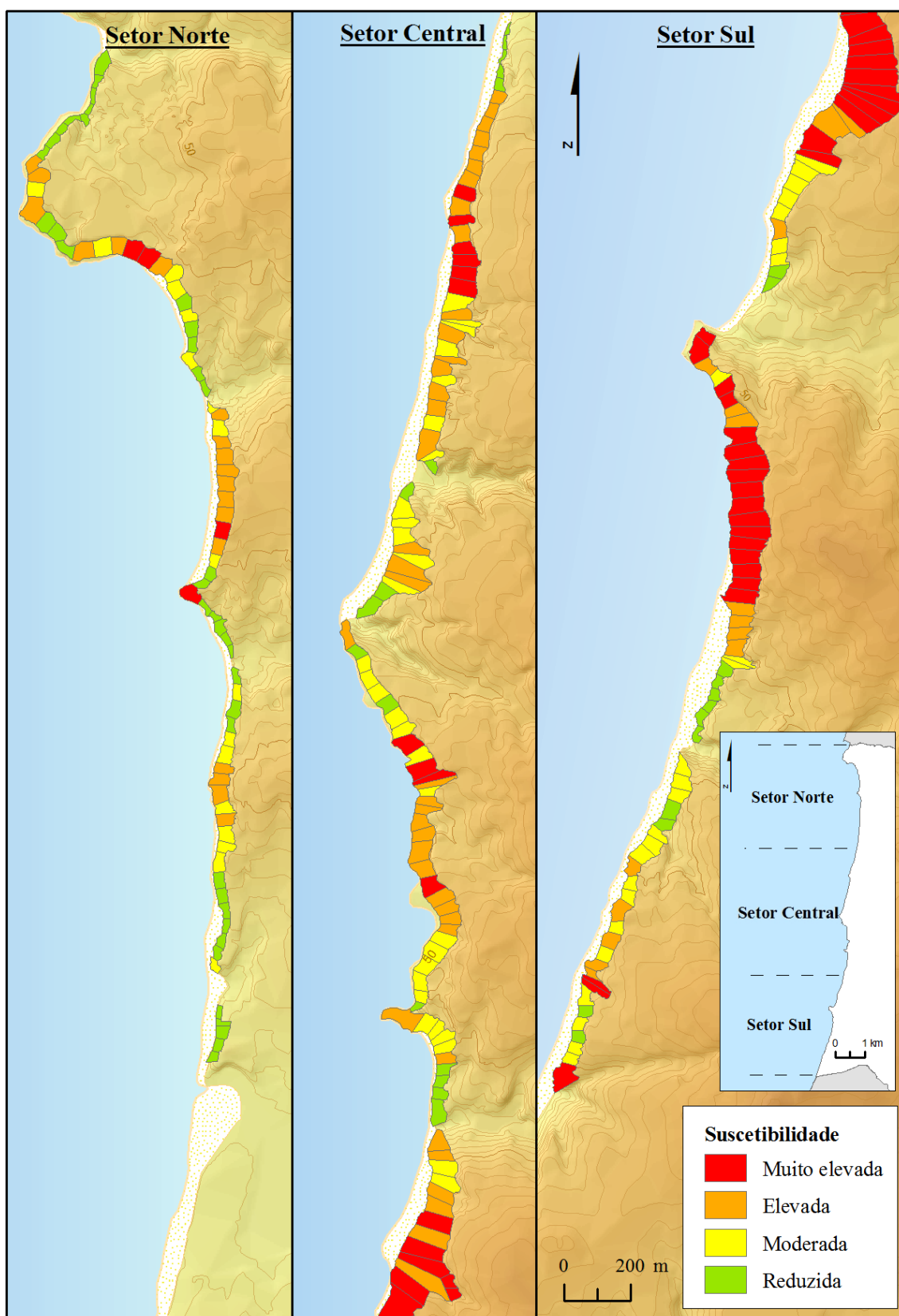
A suscetibilidade do território à ocorrência de deslizamentos translacionais é a mais incongruente por estar associada a um desvio padrão que oscila entre 0,05 e 0,45, revelando ser o dobro do intervalo do desvio-padrão associado aos deslizamentos rotacionais (Fig. 5.13). Ambos os gráficos apresentam uma tendência curvilínea com maior dispersão dos valores de suscetibilidade nos valores de suscetibilidade intermédia, entre 0,25 e 0,75. Registe-se que as unidades com suscetibilidade muito elevada ( $>0,75$ ) e muito baixa ( $<0,25$ ) são as mais consistentes do ponto de vista estatístico, o que é atestado pelos reduzidos desvios padrão. Já as escoadas apresentam um desvio-padrão máximo de 0,1 com valores médios de suscetibilidade muito concentrados no intervalo entre 0,2 e 0,8 (Fig. 5.13).

A espacialização dos resultados foi realizada através da importação dos valores da Regressão Logística de cada unidade de terreno e cada tipo de movimento de vertente para o ArcGIS, sendo posteriormente classificados em quatro classes de suscetibilidade (Quadro 5.7) e espacializados no território (Figs. 5.14, 5.15 e 5.16).

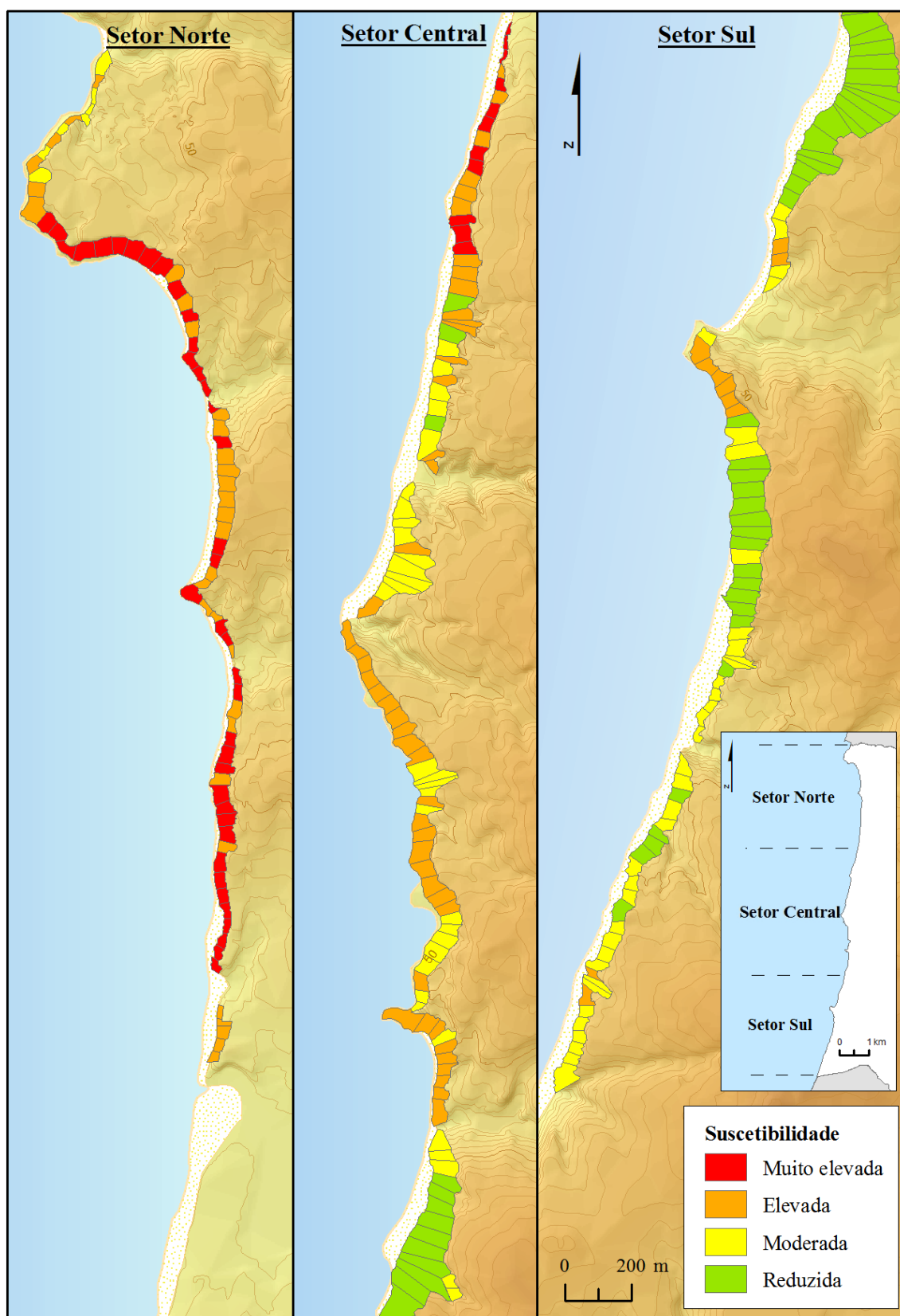
**Quadro 5.7** - Classificação da suscetibilidade aos três tipos de movimentos de vertente de acordo com o método da Regressão Logística.

Suscetibilidade (classes qualitativas)	Valores da RL	Unidades de Terreno (N)		
		Deslizamentos rotacionais	Deslizamentos translacionais	Escoadas
<b>Muito Elevada</b>	0,75 – 1,00	52	50	9
<b>Elevada</b>	0,50 – 0,75	72	87	127
<b>Moderada</b>	0,25 – 0,50	71	75	109
<b>Reduzida</b>	0,00 – 0,25	66	49	16

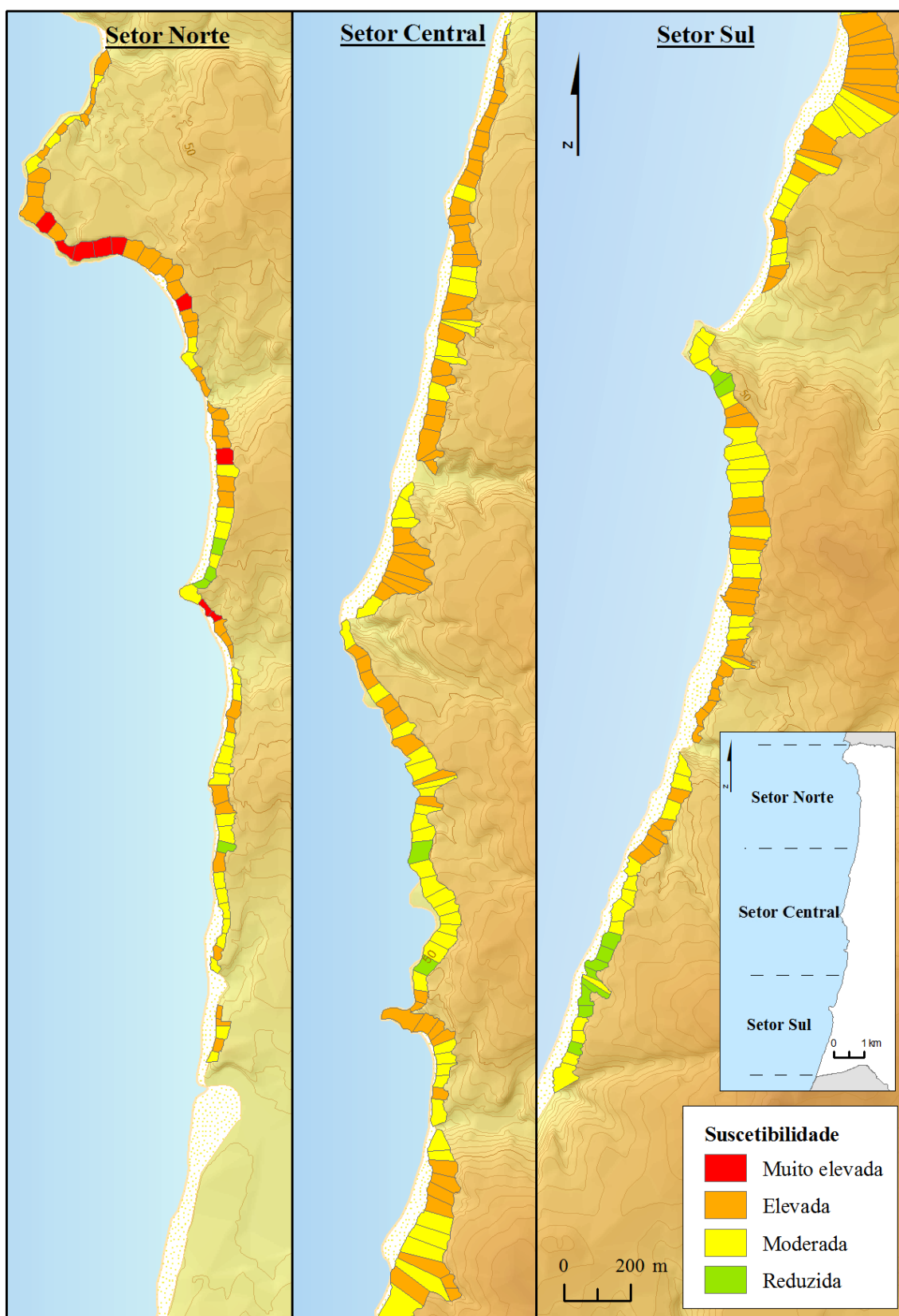




**Figura 5.14** - Mapa de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos rotacionais segundo o método da Regressão Logística.



**Figura 5.15** - Mapa de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais segundo o método da Regressão Logística.



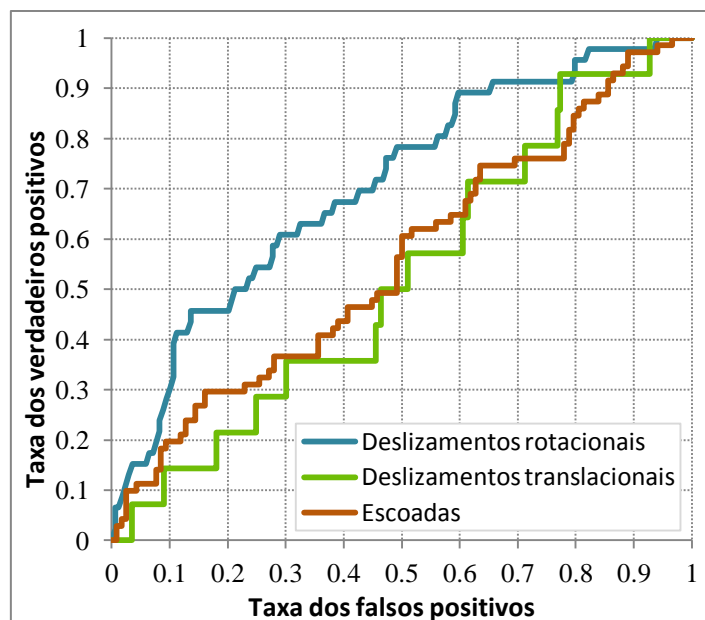
**Figura 5.16** - Mapa de suscetibilidade à ocorrência de escoadas segundo o método da Regressão Logística.

O número de unidades de terreno que integra as classes de suscetibilidade resultantes da aplicação do método da Regressão Logística apresenta diferenças face ao do Valor Informativo, pois verifica-se um aumento generalizado da suscetibilidade no território. No caso dos deslizamentos rotacionais, as unidades de terreno apresentam uma distribuição mais uniforme pelas quatro classes de suscetibilidade. Os deslizamentos translacionais destacam-se pelo grande aumento de unidades classificadas com suscetibilidade “Moderada”, “Elevada” e “Muito elevada” (duas vezes ou mais, por comparação com os resultados do Valor Informativo para as classes com designação equivalente). No caso das escoadas, as classes “Reduzida” e “Muito elevada” estão menos representadas nos modelos de suscetibilidade, por comparação com os outros tipos de movimentos de vertente.

À semelhança dos modelos obtidos pelo método do Valor Informativo, também os modelos referentes ao método da Regressão Logística apresentam grande variação espacial da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente. Neste caso, o território surge com classes de suscetibilidade mais elevada estabelecendo novos setores de arribas bastante suscetíveis. O modelo de suscetibilidade referente aos deslizamentos rotacionais classifica setores de arribas na Praia do Caniçal e Paimogo como território suscetível, algo que não é considerado no modelo do Valor Informativo. Relativamente aos deslizamentos translacionais, verifica-se um aumento generalizado da suscetibilidade entre Paimogo e Praia da Areia Branca, surgindo a região norte de Porto das Barcas e a Praia da Peralta como áreas de elevada suscetibilidade. Quanto às escoadas, o território revela maior número de unidades de terreno classificadas com suscetibilidade “Moderada” e “Elevada”, sendo de destacar a região de Paimogo por surgir com maior área classificada de “Elevada” e “Muito elevada”.

As curvas ROC de predição referentes aos modelos de suscetibilidade elaborados pelo método da Regressão Logística (Fig. 5.17), também indicam diferenças em relação às curvas equivalentes obtidas com o método do Valor Informativo. A qualidade dos modelos encontra-se mais diferenciada, salientando-se, igualmente, como modelo de suscetibilidade que apresenta maior qualidade o correspondente aos deslizamentos rotacionais, cuja AAC é de 0,706. Quanto às restantes duas tipologias, a qualidade dos

modelos é bastante reduzida e próxima do mínimo elegível ( $AAC = 0,5$ ), com as escoadas a revelarem o valor de 0,556, enquanto os deslizamentos translacionais não vão além de 0,523.

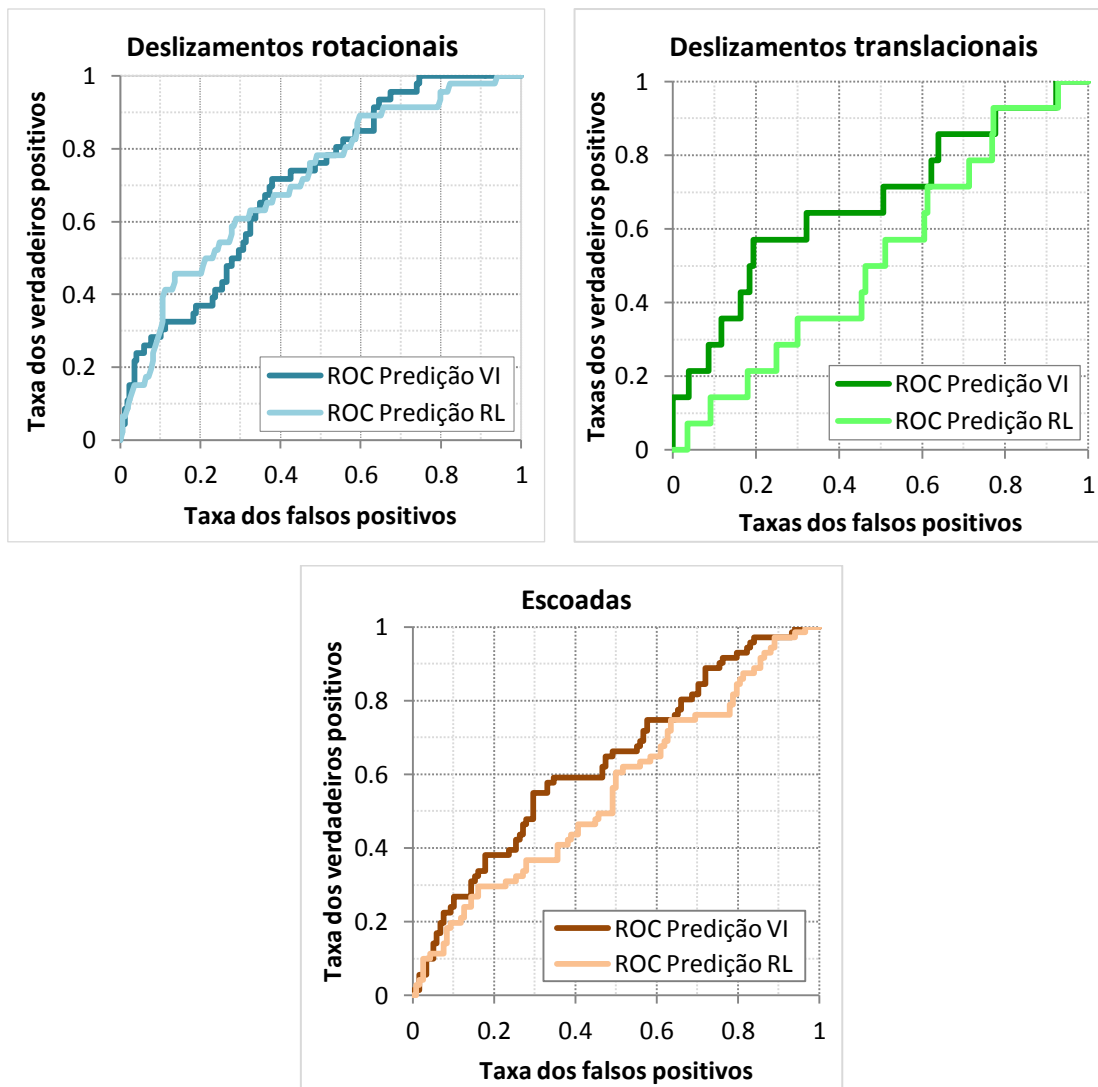


**Figura 5.17** - Curvas ROC de predição dos modelos de suscetibilidade produzidos pelo método da Regressão Logística para as diferentes tipologias de movimentos de vertente.

#### 5.4.4 COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE

Com a intenção de determinar o melhor método estatístico que permite criar modelos de suscetibilidade com maior qualidade para a faixa costeira do concelho da Lourinhã, efetua-se de seguida a comparação (visual e quantitativa) das curvas ROC de predição entre os dois métodos estatísticos, individualmente para cada tipologia de movimentos de vertente (Fig. 5.18). Os deslizamentos rotacionais possuem curvas ROC bastante semelhantes para ambos os modelos, sendo apenas diferenciadas de forma rigorosa através das AAC. A curva referente à Regressão Logística tem uma AAC de 0,706 e a do Valor Informativo uma AAC de 0,703, o que revela uma diferença pouco significativa. Quanto aos deslizamentos translacionais e escoadas as curvas evidenciam diferentes aspetos. As curvas referentes aos modelos do Valor Informativo encontram-se acima das curvas da Regressão Logística, sendo mais notória esta diferença no caso dos deslizamentos translacionais. As respetivas AAC traduzem esse comportamento:

no caso dos deslizamentos translacionais 0,674 e 0,523 para o Valor Informativo e Regressão Logística, respetivamente, e no caso das escoadas, 0,635 e 0,556 para o Valor Informativo e Regressão Logística, respetivamente.



**Figura 5.18** - Curvas ROC de predição dos modelos de avaliação da suscetibilidade produzidos com o Valor Informativo e Regressão Logística para diferentes tipologias de movimentos de vertente.

Demonstra-se, assim, que os dois métodos estatísticos utilizados apresentam diferenças no que respeita aos deslizamentos translacionais e escoadas, sendo o método da Regressão Logística menos eficiente na modelação da suscetibilidade aos movimentos de vertente. Deste modo, verifica-se que, a nível global, os modelos obtidos pelo método do Valor Informativo são os que possuem melhor qualidade preditiva.

## **CAPÍTULO 6 – AVALIAÇÃO DA PERIGOSIDADE**

A perigosidade geomorfológica, tal como foi referido no Capítulo 2, é constituída pela componente espacial e temporal de um determinado fenómeno. Ao longo da presente dissertação pode-se considerar que ambas as componentes da perigosidade foram analisadas: a componente espacial através da avaliação da suscetibilidade; e a componente temporal através da análise do recuo das arribas, dado que considera um intervalo de tempo que é conhecido (60 anos). No entanto, esta componente temporal resume-se somente a uma aproximação ao que frequentemente é considerado em estudos de avaliação da perigosidade, uma vez que não traduz a probabilidade de ocorrência que habitualmente está agregada ao conceito.

A comparação dos resultados obtidos na avaliação da suscetibilidade geomorfológica para cada tipologia de movimentos de vertente e na determinação das taxas de recuo das arribas da Lourinhã (efetuadas em capítulos anteriores) mostra que existe alguma discordância a nível espacial entre as áreas de maior suscetibilidade e os locais que apresentam maiores taxas de recuo das arribas. A informação contida nestes resultados, que regra geral são utilizados de forma independente na análise da suscetibilidade, pode ser integrada com a finalidade de classificar a perigosidade geomorfológica do território. Assim, é possível obter um mapa de perigosidade pela integração das duas metodologias utilizadas nos Capítulos 4 e 5, o que poderá levar à redução das incertezas detetadas na análise das taxas de recuo e na avaliação da suscetibilidade. Para a elaboração do mapa de perigosidade é necessário, em primeiro lugar, uniformizar e generalizar a informação obtida referente às taxas de recuo e à avaliação da suscetibilidade.

## 6.1 CLASSIFICAÇÃO DAS TAXAS DE RECUO DAS ARRIBAS

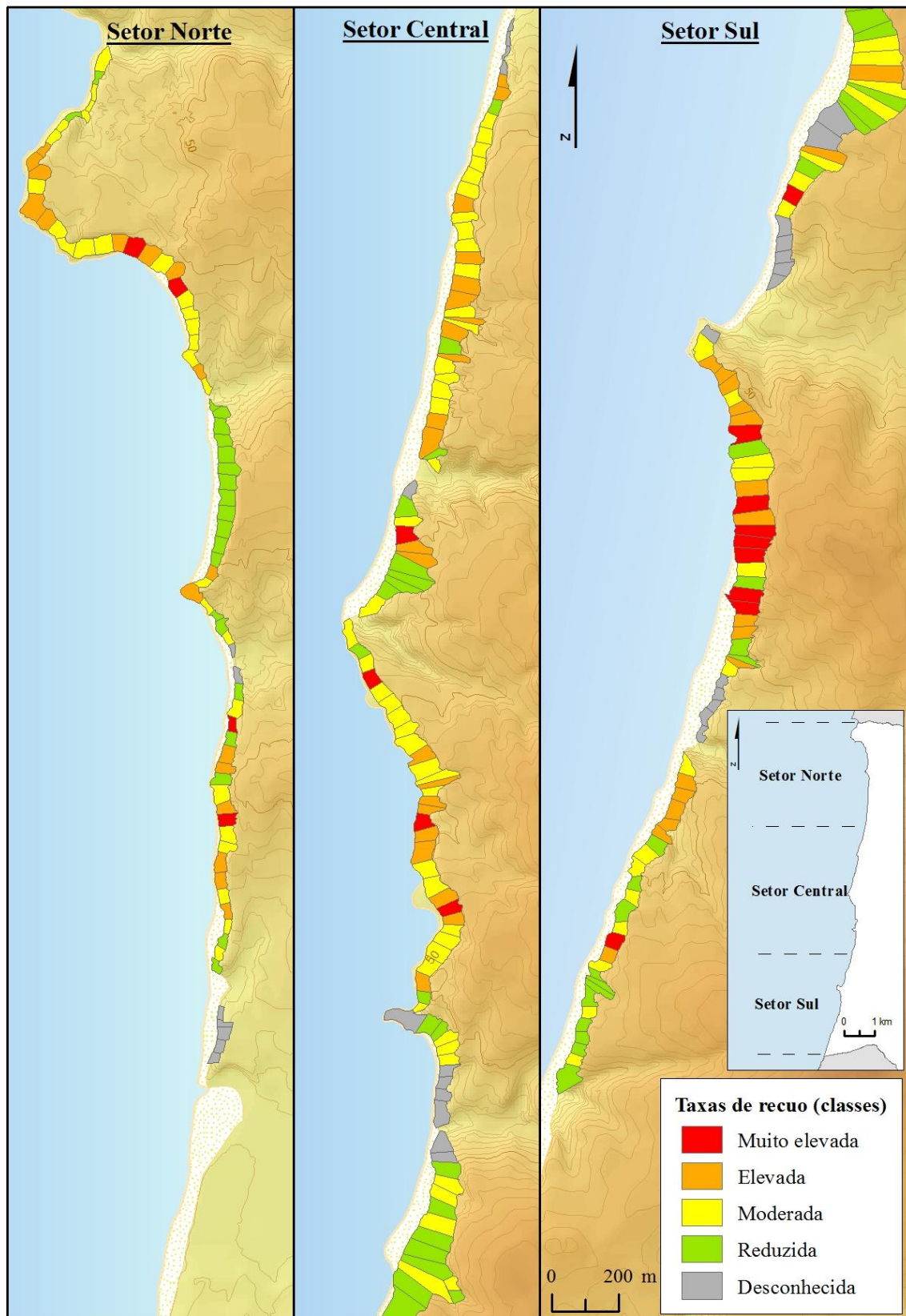
As taxas de recuo das arribas, anteriormente determinadas e apresentadas no Capítulo 4, fornecem indicadores quantitativos relativos à evolução do recuo das arribas ao longo dos últimos 60 anos. Embora as taxas de recuo já estejam integradas nas unidades de terreno, como forma de representação no território, para esta etapa é necessário classificá-las em classes qualitativas, com o propósito de serem integradas com a informação proveniente do mapa de suscetibilidade. Em conformidade com o número de classes adotado no modelo de suscetibilidade, foram definidas quatro classes de acordo com os intervalos uniformes das taxas de recuo (Quadro 6.1).

**Quadro 6.1** - Classes das taxas de recuo das arribas integradas nas unidades de terreno.

<b>Taxas de recuo</b> (classes qualitativas)	<b>Intervalos das taxas de recuo</b> (m/ano)	<b>Unidades de Terreno (N)</b>
<b>Muito elevada</b>	$\geq 0,065$	17
<b>Elevada</b>	0,050 – 0,0650	57
<b>Moderada</b>	0,035 – 0,050	93
<b>Reduzida</b>	$< 0,035$	62
<b>Indeterminada</b>	-	32

Na Figura 6.1 é apresentado o mapa das taxas de recuo integradas nas unidades de terreno e classificadas de acordo com o Quadro 6.1.





**Figura 6.1** - Taxas de recuo da crista das arribas integradas nas unidades de terreno.

## 6.2 AVALIAÇÃO E CARTOGRAFIA DA SUSCETIBILIDADE GEOMORFOLÓGICA PARA O CONJUNTO DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

Anteriormente, no Capítulo 5, foi efetuada a avaliação da suscetibilidade geomorfológica a movimentos de vertente, a título individual para cada tipologia de movimentos considerados neste estudo com recurso a dois métodos estatísticos distintos. Pretendendo-se quantificar a perigosidade do território, de forma global, simples e integrada, torna-se necessário elaborar um único modelo de suscetibilidade que contemple todos os movimentos presentes na área de estudo, ou seja, o conjunto dos movimentos de vertente inventariados. Sendo necessário adotar-se um dos métodos utilizados na avaliação da suscetibilidade, optou-se pela utilização do método do Valor Informativo, por ter apresentado melhores resultados aquando da produção de modelos de suscetibilidade para diferentes tipologias de movimentos de vertente. A metodologia utilizada seguiu as mesmas etapas da avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente por tipologias, com a diferença de, neste caso, terem sido considerados em simultâneo todas as tipologias de movimentos de vertente para produzir o modelo preditivo. O processo de modelação respeitou a definição prévia de grupos de modelação e validação.

O Quadro 6.2 apresenta os Valores Informativos para cada classe de cada variável para o conjunto dos movimentos de vertente.

**Quadro 6.2** - Valores Informativos obtidos para as classes dos fatores de predisposição referentes ao conjunto dos movimentos de vertente.

Variáveis	Classes	Código	Valor Informativo
Altura (m)	< 30	ALT1	-0,268
	30 - 40	ALT 2	0,018
	40 - 50	ALT 3	0,007
	50 - 60	ALT 4	0,061
	60 - 70	ALT 5	0,025
	> 70	ALT 6	0,060

<b>Declive médio (°)</b>	< 25	DMD1	-0,125
	25 - 30	DMD2	0,006
	30 - 32,5	DMD3	-0,040
	32,5 - 35	DMD4	0,155
	35 - 40	DMD5	0,056
	40 - 45	DMD6	-0,125
	> 45	DMD7	-0,087
<b>Declive máximo (°)</b>	< 50	DMX1	-0,074
	50 - 55	DMX2	-0,025
	55 - 60	DMX3	0,020
	60 - 65	DMX4	0,067
	65 - 70	DMX5	-0,084
	70 - 75	DMX6	0,011
	> 75	DMX7	0,051
<b>Desvio-padrão do declive (°)</b>	< 9	DPD1	0,041
	9 - 10,5	DPD2	0,000
	10,5 - 12	DPD3	0,045
	12 - 13,5	DPD4	-0,087
	13,5 - 15	DPD5	0,064
	15 - 18	DPD6	-0,063
	> 18	DPD7	0,000
<b>Curvatura em perfil</b>	Côncavo	CPF1	0,000
	Plano	CPF2	-0,176
	Convexo	CPF3	0,035
<b>Curvatura em planta</b>	Convergente	CPT1	0,027
	Plano	CPT2	-0,222
	Divergente	CPT3	0,000
<b>Radiação solar (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	< 950	RSP1	-0,051
	950 - 1025	RSP2	-0,018
	1025 - 1100	RSP3	0,051
	1100 - 1175	RSP4	0,000
	> 1175	RSP5	-0,008
<b>Unidades litológicas</b>	$J_{AP}^3$	UL1	-0,016
	$J_{BO}^3$	UL2	0,016
	$J_{SO}^3$	UL3	-0,039
	$J_{AP}^3 - J_{BO}^3$	UL4	0,176
	$J_{AP}^3 - J_{SO}^3$	UL5	0,125
	$J_{BO}^3 - J_{SO}^3$	UL6	0,079
<b>Estrutura geológica</b>	0 a 5° - Norte	EG1	0,029
	0 a 5° - Sul	EG2	0,051
	5 a 15° - Sul	EG3	-0,114

De acordo com os Valor Informativos do Quadro 6.2 verifica-se que o conjunto dos movimentos de vertente ocorre preferencialmente em arribas simultaneamente talhadas em duas unidades litológicas (UL4, UL5 e UL6), com declives médios entre 32,5 e 35° (DMD4) e declives máximos entre 60 e 65° (DMX4).

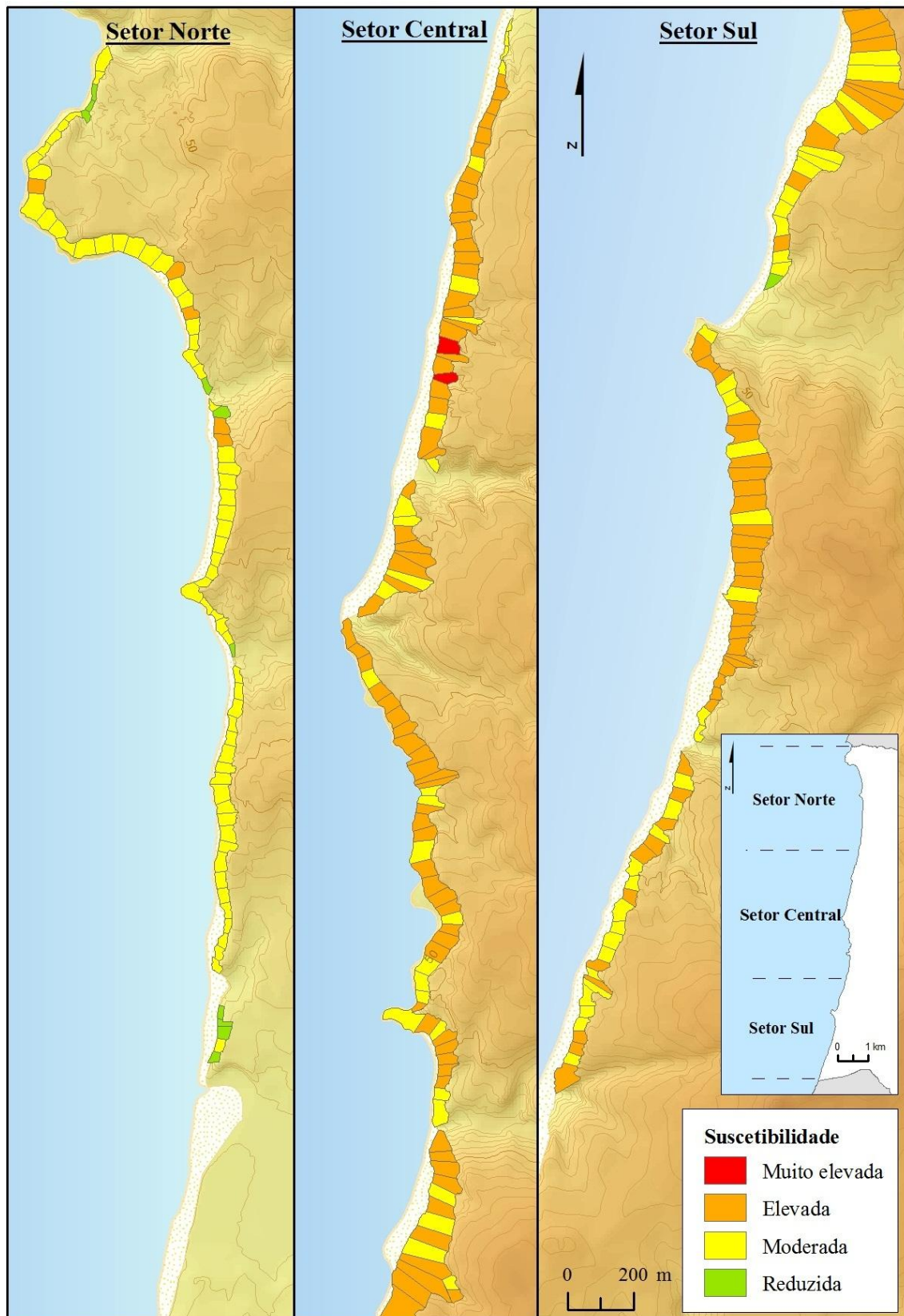
As classes de suscetibilidade foram elaboradas de acordo com as classes adotadas anteriormente para os modelos de suscetibilidade desenvolvidos para cada tipo de movimento de vertente (Quadro 6.3).

**Quadro 6.3** - Classes de suscetibilidade para o conjunto dos movimentos de vertente determinada pelo método do Valor Informativo.

Suscetibilidade (classes qualitativas)	Scores do VI	Unidades de Terreno (N)
Muito elevada	$\geq 0,5$	2
Elevada	0,0 – 0,5	121
Moderada	-0,5 – 0,0	127
Reduzida	$< -0,5$	11

A distribuição das unidades de terreno pelas classes de suscetibilidade revela grande discrepância entre as classes “Muito elevada” e “Reduzida” relativamente às classes “Elevada” e Moderada”, devendo-se à reduzida gama dos Valores Informativos finais obtidos (entre -0,862 e 0,505). Esta situação é semelhante ao sucedido com as escoadas nos dois métodos estatísticos utilizados (Valor Informativo e Regressão Logística) e poderá ser explicada pelo elevado número de unidades de terreno instabilizadas ao longo de toda a área de estudo. Consequentemente, o modelo não discrimina da melhor forma as classes mais favoráveis e menos favoráveis à instabilidade, acabando por apresentar um pior desempenho.

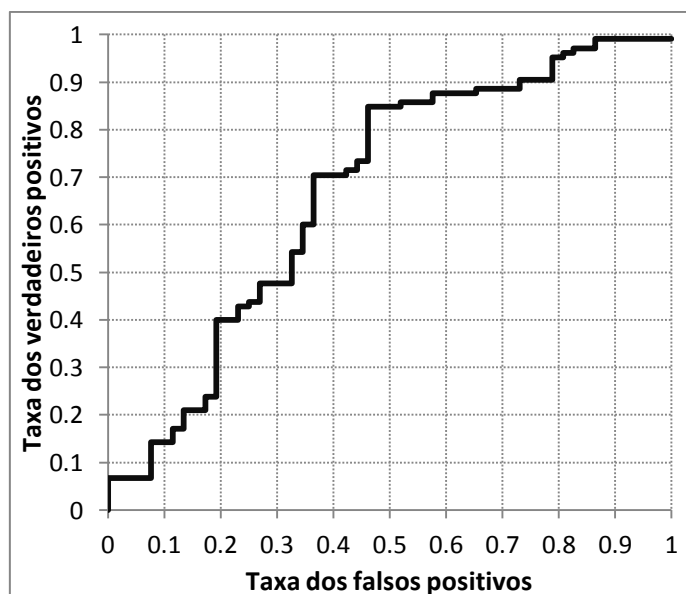
O modelo de suscetibilidade para o conjunto dos movimentos de vertente classificado de acordo com o Quadro 6.3 encontra-se representado na Figura 6.2.



**Figura 6.2** - Mapa de suscetibilidade para o conjunto de movimentos de vertente obtido pelo método do Valor Informativo.

O modelo de suscetibilidade (Figura 6.2) atribui maioritariamente ao território as classes de suscetibilidade “Moderada” e “Elevada”, discriminando o setor Norte com a classe de suscetibilidade “Moderada” e os setores Central e Sul com a classe “Elevada”.

A curva ROC de predição referente ao modelo (Fig. 6.3) indica, através de uma AAC quantificada em 0,614, que o modelo apresenta uma qualidade aceitável. Em comparação com os modelos produzidos para cada tipo de movimento de vertente, este modelo demonstra menor qualidade preditiva e não discrimina tão bem as áreas mais suscetíveis das áreas menos suscetíveis. Este facto confirma a vantagem em modelar a suscetibilidade individualmente para cada tipologia de movimentos de vertente, uma vez que estes tendem a ser condicionados de modo diferente pelos mesmos fatores condicionantes (Zêzere, 2002).



**Figura 6.3** - Curva ROC de predição do modelo de suscetibilidade produzido pelo método do Valor Informativo para o conjunto dos movimentos de vertente.

### 6.3 INTEGRAÇÃO DAS TAXAS DE RECUO DAS ARRIBAS COM A SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE

O processo de integração da informação contemplada no mapa de suscetibilidade ao conjunto dos movimentos de vertente e no mapa das taxas de recuo das arribas resulta da utilização de uma matriz de perigosidade (Quadro 6.4) que cruza as 4 classes de cada um dos mapas anteriores (Reduzida, Moderada, Elevada e Muito elevada).

Considera-se que a perigosidade é (i) Reduzida quando ambas as classes de suscetibilidade e taxa de recuo são Reduzidas ou quando uma é Reduzida e a outra é Moderada; (ii) Moderada quando ambas as classes são Moderadas ou quando uma é Elevada e a outra é Reduzida; (iii) Elevada quando uma das classes é Elevada e a outra é Moderada ou Elevada ou quando uma é Muito elevada e a outra é Reduzida ou Moderada; e (iv) Muito elevada quando ambas as classes são Muito elevadas ou quando uma é Elevada e a outra é Muito Elevada (Quadro 6.4). A matriz é caracterizada por ser conservadora ao optar por fornecer maior possibilidade de integração na classe Elevada, ao invés da classe Moderada.

Das 261 unidades de terreno presentes na área de estudo, apenas 229 foram classificadas de acordo com a matriz, uma vez que as restantes 32 unidades de terreno não apresentam informação sobre as taxas de recuo. O mapa de perigosidade resultante da aplicação da matriz é apresentado na Figura 6.4.

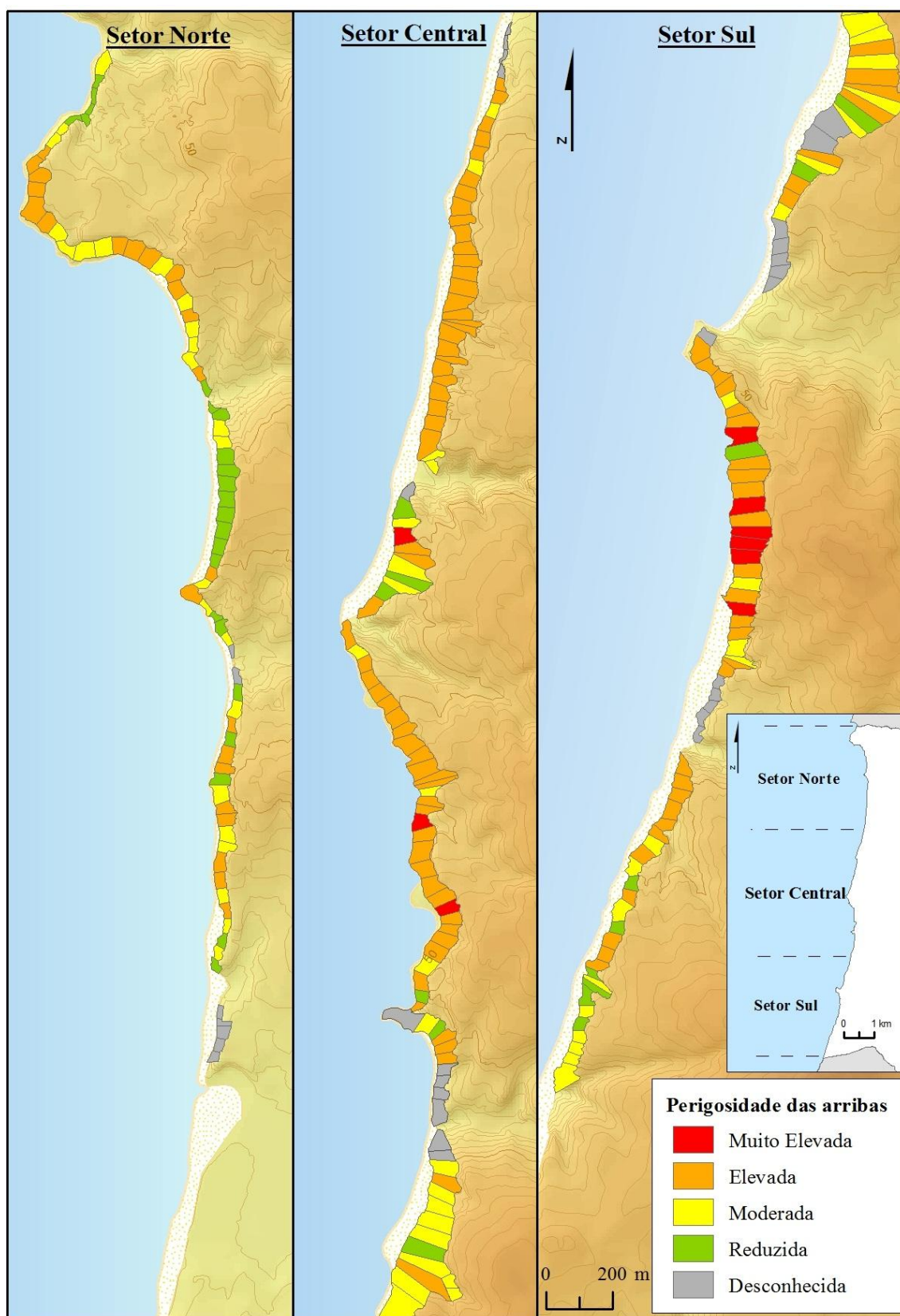
**Quadro 6.4** - Matriz de perigosidade resultante da integração das classes de suscetibilidade e das taxas de recuo das arribas.

		Classes das taxas de recuo			
		Reduzida	Moderada	Elevada	Muito elevada
Classes de suscetibilidade a movimentos de vertente	Muito elevada				
	Elevada				
	Moderada				
	Reduzida				

Legenda:  Reduzida  Moderada  Elevada  Muito elevada





**Figura 6.4** - Mapa de perigosidade das arribas no litoral da Lourinhã.







Através da Figura 6.4 constata-se a dominância da classe de perigosidade elevada na área de estudo, uma vez que 51,1% das unidades de terreno têm esta classificação. A classe de perigosidade moderada é a segunda classe mais representada (com 28,4% das unidades de terreno), seguindo-se a classe de perigosidade reduzida (com 16,6% das unidades de terreno), e por último a classe de perigosidade muito elevada (presente em apenas 3,9% das unidades de terreno).

Para analisar a influência quer do mapa de suscetibilidade, quer do mapa das taxas de recuo sobre o mapa de perigosidade e as alterações de classes ao nível das unidades de terreno, elaborou-se uma nova matriz (Quadro 6.5) com a indicação do número de combinações identificadas correspondentes às possíveis hipóteses de integração.

**Quadro 6.5** - Distribuição das unidades de terreno na matriz de perigosidade resultante da integração das classes de suscetibilidade e das taxas de recuo das arribas.

		Classes das taxas de recuo			
		Reduzida	Moderada	Elevada	Muito elevada
Classes de suscetibilidade a movimentos de vertente	Muito elevada	1	1	0	0
	Elevada	27	50	25	9
	Moderada	33	38	32	8
	Reduzida	1	4	0	0

Legenda:  Reduzida  Moderada  Elevada  Muito elevada

Efetuada uma comparação entre as classes dos 3 mapas realizados (mapa das taxas de recuo, mapa de suscetibilidade e mapa de perigosidade) verifica-se que 64 unidades de terreno (27,9% do total) mantêm exatamente a mesma classificação em todos eles. Como seria de esperar, esta percentagem aumenta quando se compara apenas o mapa de suscetibilidade geomorfológica ou o mapa das taxas de recuo com o mapa de perigosidade: 118 unidades de terreno no caso do mapa de suscetibilidade (51,5% do total) e 138 no caso do mapa das taxas de recuo (60,3% do total) mantêm a mesma classificação. Analisando comparativamente e apenas os mapas de suscetibilidade e das taxas de recuo, verifica-se que 37 unidades de terreno (16,2% do total) apresentam consideráveis discrepâncias na sua classificação, isto é, variações superiores às suas áreas de vizinhança (classes adjacentes) (Quadro 6.5). Esta discordância de classes pode dever-se ao facto dos movimentos de vertente na área de estudo geralmente não incidirem sobre a crista das arribas, local em que são efetuadas as medições para o cálculo das taxas de recuo. Assim, embora as arribas apresentem áreas instabilizadas, e consequentemente perigosidade para o território, as taxas de recuo não mostram a mesma situação. Adicionalmente, deve também ser tomado em consideração que os deslizamentos e as escoadas são apenas alguns dos processos que provocam o recuo das arribas, e que neste estudo não foram incluídos os desabamentos que também poderão influenciar o recuo da crista da arriba, bem como os processos de erosão hídrica.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo desenvolvido ao longo da presente dissertação exigiu a aplicação de um diversificado conjunto de metodologias de trabalho, visando três conteúdos temáticos associados à evolução da zona costeira e aos riscos naturais: determinação das taxas de recuo das arribas, avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente e avaliação da perigosidade das arribas.

Para o litoral rochoso analisado obtiveram-se taxas de recuo das arribas entre 0,010 e 0,130 m/ano, estimadas para um horizonte temporal alargado, de 60 anos (entre 1947 e 2007). A utilização de fotografias aéreas bastante antigas teve repercussões ao nível dos erros associados ao processo de georreferenciação e ortorretificação, erros esses que foram quantificados para cada imagem utilizada. Sobre esta etapa do trabalho, destaca-se a ferramenta DSAS que permitiu fazer uma rápida e precisa análise quantitativa das taxas de recuo das arribas, provando ser uma mais-valia neste processo.

Através da elaboração de modelos de suscetibilidade individualizados por tipologias de movimentos de vertente constata-se uma grande variação a nível espacial das diferentes classes de suscetibilidade. No entanto, e de forma mais generalizada, verifica-se que as classes de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos rotacionais apresentam uma distribuição aproximada às classes de suscetibilidade das escoadas, e um enorme contraste com as classes de suscetibilidade aos deslizamentos translacionais. Esta variedade espacial é mais acentuada nos modelos produzidos através do método do Valor Informativo e resulta da influência das classes dos fatores de predisposição.

Segundo os scores do Valor Informativo, constata-se que as variáveis que mais influenciam a ocorrência de movimentos de vertente na presente área de estudo são a geologia e o declive, mais especificamente, o material que constitui as arribas e os declives máximos e médios. Definindo uma hierarquização das classes dos fatores de predisposição baseada nestes scores do Valor Informativo constata-se que cada tipologia de movimentos de vertente apresenta um conjunto de condições particulares que propiciam a sua ocorrência.

Em comparação com o modelo desenvolvido para o conjunto dos movimentos, os modelos de suscetibilidade produzidos para cada tipologia de instabilidade, apresentam melhores resultados, comprovados por uma maior aderência das classes de maior suscetibilidade às unidades de terreno instabilizadas. No mesmo sentido, as AAC desses modelos são relativamente melhores, face ao modelo de suscetibilidade global. Embora os valores obtidos para as AAC sejam relativamente baixos (no caso dos modelos produzidos pelo método do Valor Informativo variam entre 0,614 e 0,703), são aceitáveis do ponto de vista da modelação, tanto mais que foram obtidas com uma amostra independente de unidades de terreno instabilizadas. Neste sentido, o modelo desenvolvido para o conjunto dos movimentos de vertente ao revelar menor qualidade preditiva e não discriminar tão bem as áreas mais suscetíveis das áreas menos suscetíveis, confirma a vantagem em modelar a suscetibilidade individualmente para cada tipologia de movimentos de vertente. Assim, quando é possível separar as tipologias das instabilidades, os resultados melhoram substancialmente quando se desenvolve um modelo de suscetibilidade para cada tipo de movimentos de vertente.

Quanto aos dois métodos estatísticos utilizados, é de registar que o Valor Informativo destaca-se positivamente face à Regressão Logística. O método bi-variado relaciona de forma discriminatória os movimentos de vertente com as classes das variáveis em estudo e produziu modelos de suscetibilidade com melhor capacidade preditiva.

Na área de estudo as áreas de maior suscetibilidade e os locais que apresentam maiores taxas de recuo das arribas revelam alguma discordância a nível espacial. Esta discordância pode ser explicada pelo facto da maioria (90 %) dos movimentos de vertente não afetar a crista da arriba, local onde as taxas de recuo são medidas, bem como por não se considerarem os processos de erosão hídrica e os desabamentos, processos que influenciam igualmente o recuo das arribas.

O processo de integração da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente com as taxas de recuo das arribas permitiu reduzir as incertezas associadas aos respetivos resultados e classificar a perigosidade geomorfológica do território, devido ao carater temporal inerente às taxas de recuo. No litoral da Lourinhã, destacam-se a praia do Caniçal por apresentar perigosidade reduzida e, no extremo oposto, ou seja com perigosidade elevada a muito elevada, a área a sul de Porto Dinheiro.

De acordo com os resultados obtidos, é possível afirmar que a metodologia utilizada é bastante adequada a estudos de âmbito regional. Os resultados evidenciam que os objetivos inicialmente estabelecidos foram atingidos com sucesso.

A utilização de modelos de suscetibilidade para cada tipologia de movimento de vertente pode vir a constituir uma mais-valia para os responsáveis pela gestão e ordenamento do território, dado que possibilitam uma avaliação da suscetibilidade mais detalhada, sendo desta forma possível a implementação de medidas mais específicas para as áreas afetadas. Com o aumento da urbanização nesta costa, é igualmente importante estabelecer zonas de perigosidade que devem ser consideradas para um futuro planeamento e gestão, no sentido de reduzir a probabilidade de ocorrência de futuros incidentes relacionados com a instabilidade de vertentes.

A realização deste estudo permitiu identificar alguns aspetos que podem constituir uma mais-valia ao serem considerados em futuras investigações no âmbito da temática desta dissertação. Seria útil e interessante: (i) investigar a melhor forma de agrupar os valores em classes, incidindo sobre o número de classes e dimensão e limites entre classes dos fatores de predisposição; (ii) proceder à avaliação da suscetibilidade à ocorrência de desabamentos, como forma de complementar todas as tipologias de movimentos que ocorrem neste litoral de arribas; (iii) efetuar a georreferenciação e ortorretificação das fotografias aéreas antigas através de *software* de processamento fotogramétrico que realizam esta operação de forma automática e com maior exatidão; e (iv) avaliar a vulnerabilidade dos elementos expostos e o risco aos movimentos de vertente, de forma a permitir a implementação de ações para gerir e controlar o risco, reduzindo os seus impactos sobre as pessoas e bens localizados na faixa costeira.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, C., Pires, H.O., Silva, P., Taborda, R., Freitas, M.C. (2006) – Zonas Costeiras. In: Santos, F.D., Miranda, P. (eds.), *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação*. Projeto SIAM II, Gradiva, pp. 169-208.
- APA (2012a) – *Plano de Ação de Proteção e Valorização do Litoral 2012-2015*. Agência Portuguesa do Ambiente – Administração da Região Hidrográfica do Tejo. 88p.
- APA (2012b) – *Plano das Bacias Hidrográficas das Ribeiras do Oeste*. Relatório Técnico. Síntese. Agência Portuguesa do Ambiente – Administração da Região Hidrográfica do Tejo. 227p.
- ARH-Tejo (2010) – *Avaliação dos POOC da Área de Jurisdição da ARH do Tejo, IP. Definição de Objectivos e Conteúdos para a sua Revisão – 2ª Fase*. Administração da Região Hidrográfica do Tejo. 259p.
- Atkinson, P.M., Massari, R. (1998) – Generalized linear modeling of susceptibility to landsliding in the central Apennines. Italy. *Computers and Geosciences*, 24(4): 373-385.
- Ayalew, L., Yamagishi, H. (2005) – The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65: 15-31.
- Beguiría, S. (2006) – Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37: 315-329.
- Bergonse, R., Bidarra, J. (2010) – Probabilidade Bayesiana e Regressão Logística na avaliação da susceptibilidade de ocorrência de incêndios de grande magnitude. *Finisterra*, 89, Vol.XLV: 79-104.
- Brabb, E.E. (1984) – Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. In: *Proceedings of 4<sup>th</sup> International Symposium on Landslides* (Toronto, Canada), Vol. 1: 307-323.
- Can, T., Nefeslioglu, H., Gokceoglu, C., Sommez, H., Duman, T. (2005) – Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. *Geomorphology*, 72: 250-271.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. (1992) – Uncertainty in Assessing Landslide Hazard and Risk. *ITC Journal*, 2: 172-183.

- Carrara, A. (1993) – Uncertainty in evaluating landslide hazard and risk. *In: Nemec, J., Nigg, J.M., Siccardi, F. (eds.), Predictions and Perception of Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers, Vol.2: 101-109.
- Carrara, A., Crosta, G., Frattini, P. (2008) – Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology*, 94: 353-378.
- Castedo, R., Murphy, W., Lawrence, J., Paredes, C. (2012) – A new process-response coastal recession model of soft rock cliffs. *Geomorphology*, 177-178: 128-143.
- Chaminé, H.I., Fonseca, P.E., Carvalho, J.M., Azevedo, M., Gomes, A., Teixeira, J. (2004) – Geometria, cinemática e dinâmica diapírica da morfoestrutura do Vimeiro (Torres Vedras, Portugal central: implicações para um modelo hidrogeológico. *Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe*, 29: 9-30.
- Chen, Z., Wang, J. (2007) – Landslide hazard mapping using logistic regression model in Mackenzie Valley, Canada. *Natural Hazards*, 42: 75-89.
- Chung, C.J., Fabbri, A. (2003) – Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Natural Hazard*, 30(3): 451-472.
- Corominas, J., Remondo, J., Farias, P., Estevão, M., Zêzere, J.L., Díaz De Terán, J., Dikau, R., Schrott, L., Moya, J., González, A. (1996) – Debris flow. *In: Dikau, R., Schrott, L., Ibsen, M. L., (eds.), Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 161-180.
- Cox, D.R. (1958) – The regression analysis of binary sequences (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society B*, 20: 215-242.
- Crozier, M.J., Glade, T. (2005) – Landslide hazard and risk: Issues, concepts and approach. *In: Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J. (eds.), Landslides hazard and risk*. John Wiley & Sons, New York, pp. 1-40.
- Cruden, D.M. (1991) – A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43: 27-29.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996) – Landslide types and processes. *In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (eds.), Landslide, Investigation and Mitigation*. Transportation Research Council, National Academy Press, Washington DC, Spatial Report 247, pp. 36-75.
- Dahal, R.K., Hasegawa, S., Bhandary, N., Poudel, P., Nonomura, A., Yatabe., R. (2012) – A replication of landslide hazard mapping in catchment scale. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 28p.
- Dai, F.C., Lee, C.F. (2002) – Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42: 213-238.



- Davidson-Arnott, R. (2010) – *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Cambridge University Press, 442p.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schortt, L., Ibsen, M.L. (1996) – Landslide Research in Europe. *Geomorphology*, 15: 227-280.
- EEA (2006a) – *The changing faces of Europe's coastal areas*. European Environment Agency (EEA), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. Report 6/2006. 107p.
- EEA (2006b) – *Progress towards halting the loss of biodiversity by 2010*. European Environment Agency (EEA). Report 5/2006. 99p.
- Emery, K.O., Kuhn, G.G. (1982) – Sea cliffs: their processes, profiles and classification. *Geologic Society of America Bulletin*, 93: 644-654.
- Epifânio, B., Zêzere, J.L., Neves, M. (2012) - Avaliação da suscetibilidade das arribas da Lourinhã a movimentos de vertente de diferentes tipologias. *In*: Freitas, M.C., Cascalho, J., Taborda, R., Ribeiro, M., Drago, T., Andrade, C., Fatela, F., Cruces, A. (eds.), *VII Simpósio sobre a Margem Ibérica Atlântica* (Lisboa, Portugal): 191-197.
- Eurosion (2004) – *Living with coastal erosion in Europe: sediment and space for sustainability*. Result from the Eurosion Study. 40p.
- Frattoni, P., Crosta, G., Carrara, A., Agliardia, F. (2008) – Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology*, 94: 419-437.
- Frattoni, P., Crosta, G., Carrara, A. (2010) – Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*, 111 (1-4): 62-72.
- Freitas, M.C., Andrade, C., Cachado, C., Cardoso, A.C., Monteiro, J.H., Brito, P., Rebelo, L. (2006) – Coastal land-loss associated with sea-level rise assessed by aerial videotape-assisted vulnerability analysis – the case of mainland Portugal. *Journal of Coastal Research*, SI39, (Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Coastal Symposium): 1310-1315.
- Garcia, R., Zêzere, J. (2003) – Avaliação de Riscos Geomorfológicos: Conceitos, Terminologia e Métodos de Análise. *III Seminário Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território*, Livro de Actas, Vila Real, pp. 299-308.
- Glade, T., Crozier, M.J. (2005) – The natural of landslide hazard impact. *In*: Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J. (eds.), *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester, pp. 43-74.

- Gorsevski, P.V., Gessler, P., Foltz, R.B. (2000) – Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and GIS. *4<sup>th</sup> International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4)*. Banff, Alberta. 9p.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P., Foltz, R.B., Elliot, W. (2006) – Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and ROC Analysis. *Transactions in GIS*, 10(3): 395-415p.
- Griggs, G.B., Trenhaile, A.S. (1994) – Coastal cliffs and platforms. In: Carter, R.W.G., Woodroffe, C.D. (eds.), *Costal Evolution – Late Quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 425-450.
- Gueremy, P. (1984) – Rapport de présentation – Section II – Cartographie des risques de mouvements de terrain et cartographies intégrées des risques naturels. *Mouvements de Terrain. Colloque de Caen. Documents du B. R. G. M.*, 83, Paris, pp. 123-129.
- Guillard, C., Zêzere, J.L. (2012) – Landslide Susceptibility Assessment and Validation in the Framework of Municipal Planning in Portugal: The Case of Loures Municipality. *Environmental Management*, 50: 721-735.
- Gulyaev, S.A., Buckeridge, J.S. (2004) – Terrestrial methods for monitoring cliff erosion in an urban environment. *Journal of Coastal Research*, 20(3): 871-878.
- Gusmão, M.F. (2010) – *Evolução actual do litoral da Foz do Lizandro – Malhadinha*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999) – Landslide Hazard Evolution: a Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy. *Geomorphology*, 31: 181-216.
- Hapke, C.J., Reid, D., Richmond, B. (2009) – Rates and Trends of Coastal Change in California and the Regional Behavior of the Beach and Cliff System. *Journal of Coastal Research*, 25: 603-615.
- Henriques, C. (2009) – *Dinâmica de Vertentes no Contexto da Reserva Ecológica Nacional: o Caso de Estudo do Concelho de Caldas da Rainha*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Himmelstoss, E.A. (2009) – DSAS 4.0 Installation Instructions and User Guide. In: Thieler, E.R., Himmestoss, E.A., Zichichi, J.L., Ergul, Ayhan (eds.), *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 – An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

- INAG (2001) – *Plano de Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Oeste*. Relatório Final. Instituto da Água, I.P. Lisboa.
- IPCC (2007) – *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, 996 pp.
- Kullberg, J.C. (2000) – *Evolução tectónica mesozoica da Bacia Lusitaniana*. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Kullberg, J.C., Rocha, R.B., Soares, A.F., Rey, J., Callapez, P., Martins, L. (2006) – A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In: Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., Kullberg, J.C. (eds.), *Geologia de Portugal no Contexto da Ibéria*, pp. 317-368.
- Lee, E.M. (2008) – Coastal cliff behavior: Observations on the relationship between beach levels and recession rates. *Geomorphology*, 101: 558-571.
- Lopes, P. (2008) – *Avaliação regional da susceptibilidade a deslizamentos no concelho de Santarém*. Dissertação de mestrado. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Malamud, B., Turcotte, D., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (2004) – Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 687-711.
- Mancini, F., Ceppi, C., Ritrovato, G. (2010) – GIS and statistical analysis for landslide susceptibility mapping in the Daunia area, Italy, *Natural Hazards and Earth System Science*, 10: 1851-1864.
- Manuppella, G., Antunes, M.T., Pais, J., Ramalho, M., Rey, J. (1999) – *Carta Geológica de Portugal na escala 1/ 50 000 e Notícia Explicativa da Folha 30-A (Lourinhã)*. Instituto Geológico e Mineiro. Lisboa. 83p.
- Marques, F.S.M.F. (1997) – *As arribas do litoral do Algarve. Dinâmica, processos e mecanismos*. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Marques, F.M. (2006) – A simple method for the measurement of cliff retreat aerial photographs. *Zeitschrift fur Geomorphologie, Supplementbande*, 144: 39-59.
- Marques, R., Queiroz, G., Coutinho, R., Zêzere, J.L. (2007) – Actividade geomorfológica desencadeada pela crise sísmica de 2005 no vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores): avaliação da suscetibilidade com recurso a regressão logística. *Dinâmicas geomorfológicas. Metodologias. Aplicação. APGEOM*, Vol. V: 47-61.

- Marques, F., Matildes, R., Redweik, P. (2011) – Statistically based sea cliff instability hazard assessment of Burgau-Lagos coastal section (Algarve, Portugal). Proceeding of the 11<sup>th</sup> International Coastal Symposium. *Journal of Coastal Research*, SI64: 927-931.
- Marques, F.M., Andrade, C. (2009) – *Parecer sobre risco associado às arribas do Algarve*. Centro de Geologia da Universidade de Lisboa. 25p.
- Mathew, J., Jha, V., Rawat, G. (2009) – Landslide susceptibility zonation mapping and its validation in part of Garhwal Lesser Himalaya, India, using binary logistic regression analysis and receiver operating characteristic curve methods. *Landslides*, 6: 17-26.
- Matildes, R. (2009) – *Detecção Fotogramétrica de Movimentos de Vertente em Arribas Costeiras e Gestão do Inventário num Sistema de Informação Geográfica*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Meneses, B. (2011) – *Susceptibilidade e Risco de Movimentos de Vertente no Concelho de Tarouca*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Moore, L., Griggs, G. (2002) – Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Marine Geology*, 181: 265-283.
- Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H. (2008) – An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Engineering Geology*, 97 (3-4): 171-171.
- Neves, M. (2004) – *Evolução actual dos litorais rochosos da Estremadura Norte. Estudo de Geomorfologia*. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Neves, M. (2006) – *Os sistemas litorais da Estremadura Norte. Classificação e caracterização geomorfológica*. Linha de Investigação em Dinâmica Litoral e Fluvial, Relatório nº4. Centro de Estudos Geográficos. Universidade de Lisboa. 118p.
- Neves, M. (2008) – Anthropogenic modifications in the erosional rhythm of a coastal cliff. Rocha do Gronho (western coast of Portugal). *Journal of Iberian Geology* 34(2): 299-312.
- Oliveira, S. (2005) – *Evolução recente da linha de costa no troço costeiro Forte Novo–Garrão (Algarve)*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.

- Pereira, S. (2009) – *Perigosidade a Movimentos de Vertente na Região Norte de Portugal*. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto.
- Pereira, S., Zêzere, J.L., Bateira, C., (2012) – Technical Note: Assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslides susceptibility models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 979-988.
- Piedade, A., Zêzere, J.L., Garcia, R., Oliveira, S. (2011) – Modelos de susceptibilidade a deslizamentos superficiais translacionais na região a norte de Lisboa. *Finisterra*, 91, Vol. XLVI: 9-26.
- Popescu, M. (1994) – A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 50: 71-74.
- Pradhan, B. (2010) – Landslide Susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches. *Journal of the Indian Society Remote Sensing*, 38: 301-320.
- Ramani, S., Pitchaimani, K., Gnanamanickam, V.R. (2011) – GIS based Landslide Susceptibility Mapping of Tevankarai Ar Sub-watershed, Kodaikkanal, India using Binary Logistic Regression Analysis. *Journal of Mountain Science*, 8: 505-517.
- Ramos-Pereira, A. (2001) – *O(s) Oceano(s) e as suas margens*. Cadernos de Educação Ambiental. Instituto de Inovação Educacional, nº5. 123p.
- Ramos-Pereira, A., Trindade, J., Neves, M. (2005) – Portugal: coastal dynamics. Field trip guide A1, *Sixth International Conference on Geomorphology*, Zaragoza, IAG: 69p.
- Ramos-Pereira, A. (2008) – *Programa de Sistemas Litorais: Dinâmica e Ordenamento*. Unidade Curricular de 2º Ciclo. Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa. 114p.
- Redweik, P., Matildes, R., Marques, F., Santos, L. (2009) – Photogrammetric methods for monitoring cliffs with low retreat rate. Proceedings of the 10th International Coastal Symposium. *Journal of Coastal Research*, SI56: 1577-1581.
- Reis, E., Zêzere, J.L., Vieira, G.T., Rodrigues, M.L. (2003) – Integração de dados espaciais em SIG para avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos, *Finisterra*, 76, Vol. XXXVIII: 3-34.
- Resolução do Conselho de Ministros nº82/2009 – Diário da República, 1ª série – Nº174 – 8 de Setembro de 2009.

- Santos, M. (2011) – *Determinação da Componente Espacial da Perigosidade nas Arribas do Litoral Algarvio (Sector Burgau-Lagos). Influência dos Factores Condicionantes na Ocorrência das Instabilidades*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Sesli, F.A., Karsli, F., Colkesen, I., Akyol, N. (2009) – Monitoring the changing position of coastlines using aerial and satellite image data: an example from the eastern coast of Trabzon, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 153: 391-403.
- Soeters, A.S., Van Westen, C.J. (1996) – Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (eds.), *Landslides. Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board. Special Report 247. National Academy Press. Washington D.C., pp. 129-177.
- Sunamura, T. (1992) – *Geomorphology of rocky coasts*. John Wiley & Sons. Chichester. 302p.
- Suzen, M.L., Doyuran, V. (2004) – A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45 (5):665-679.
- Swets, J.A. (1988) – Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240: 1285-1293.
- Terzaghi, K. (1950) – Mechanisms of Landslides. *Application of Geology to Engineering Practice*, Berkey Volume: 83-124.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Miller, T.L. (2005) – Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change. Woods Hole Massachusetts: U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1304.
- Van Den Eeckhaut, M., Marre, A., Poesen, J. (2010) – Comparison of two landslide susceptibility assessments in the Champagne – Anderne region (France). *Geomorphology*, 115: 141-155.
- Varnes, D. (1978) – Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R., Krizek, R. (eds.), *Landslides-Analysis and Control: Transportation Research Board*. Special Report 176, pp. 11-28.
- Varnes, D. (1984) – *Landslide Hazard Zonation: a Review of Principles and Practice*. UNESCO, Paris. 63p.
- Viles, H., Spencer, T. (1995) – *Coastal Problems: Geomorphology, Ecology and Society at the Coast*. Edward Arnold, London, 350p.

- WP/WLI (1993a) – A Suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 47: 53-57.
- WP/WLI (1993b) – *Multilingual Landslide Glossary*. International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party for World Landslide Inventory; The Canadian Geotechnical Society, Canada. 32p.
- Yan, T.Z. (1988) – Recent advances of quantitative prognoses of landslide in China. Bonnard, C. (ed.), *Landslides*. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides. pp. 1263-1268.
- Yesilnacar, E., Topal, T. (2005) – Landslide susceptibility mapping: A Comparison of logistic regression and artificial neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology*, 79: 251-266.
- Yin, K., Yan, T.Z. (1988) – Statistical Prediction Model for Slope Instability of Metamorphosed Rocks. In: Bonnard, C. (ed.), *Proceedings Fifth International Symposium on Landslides*, Vol.2, Balkema, Rotterdam, pp. 1269-1272.
- Young, A.P., Flick, R., Gutierrez, R., Guza, E. (2009) – Comparison of short-term seacliff retreat measurement methods in Del Mar, California. *Geomorphology*, 112: 318-323.
- Young, A.P., Guza, R., O'Reilly, W., Flick, R., Gutierrez, R. (2011) – Short-term retreat statistics of a slowly eroding coastal cliff. *Natural Hazards Earth System Science*, 11: 205-217.
- Zêzere, J.L. (1997) – *Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Zêzere, J.L. (2000) – *A Classificação dos Movimentos de Vertente Tipologia, Actividade e Morfologia*. Apontamentos de Geografia – Série de Investigação: Nº6. Centro de Estudos Geográficos, Lisboa.
- Zêzere, J.L. (2001a) – *Distribuição e ritmo dos movimentos de vertente na Região a Norte de Lisboa*. Centro de Estudo Geográficos, Área de Geografia Física e Ambiente, Relatório nº 38, Lisboa, 167p.
- Zêzere, J.L. (2001b) – A avaliação da perigosidade geomorfológica. Aplicação do método do valor informativo na área-amostra de Calhandriz. Moreira, M.E., Moura, A.C., Granja, M.H., Noronha, F. (eds.), *Homenagem (in honorum) Professor Gaspar Soares de Carvalho*. Braga, pp. 347-361.

- Zêzere, J.L. (2002) – Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 2: 73-82.
- Zêzere, J.L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Rodrigues, M.L., Vieira, G., Ferreira, A.B. (2004) – Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 4: 133-146.
- Zêzere, J.L. (2005) – Dinâmica de vertentes e risco geomorfológico. *Centro de Estudos Geográficos, Área de Geografia Física e Ambiente. Relatório Nº41, Lisboa*, 128 p.
- Zêzere, J.L. (2007) – Predição Probabilística de Movimentos de Vertente na Escala Regional. *Actes de les Jornades sobre Terrasses i Prevenció de Riscos Naturals*, Department de Medi Ambient, Consell de Mallorca, pp. 17-30.
- Zêzere, J.L., Faleh, A., Sadiki, A., Garcia, R.A.C., Oliveira, S.C. (2009) – Modelação da susceptibilidade a deslizamentos na bacia do Oued Sra (Rif central Marrocos) com métodos estatísticos bi-variados. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, Volume VI, APGEOM, Braga, pp. 203-210.
- Zviely, D., Klein, M. (2004) – Coastal cliff retreat rates at Beit-Yannayn, Israel, in the 20th century. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 175-184.

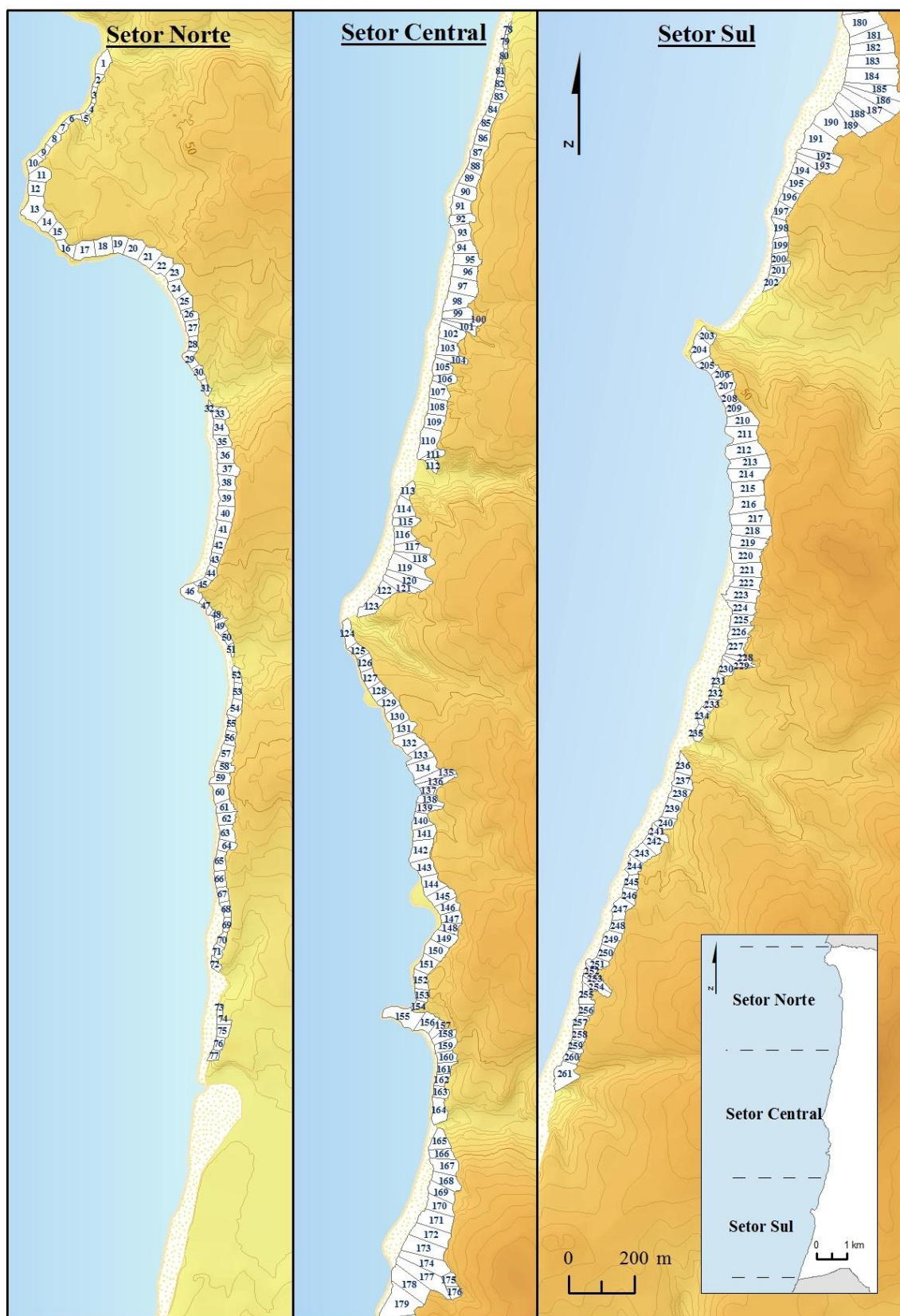
### Outras fontes de informação

- Natural Resources Canada* (2012) – Acedido a 15 de Novembro de 2012, em: <http://www.geod.nrcan.gc.ca>. Acedido a 15 de Novembro de 2012.
- IDAHO Geological Survey (2012) – Acedido a 28 de Novembro de 2012, em: <http://www.idahogeology.org>. Acedido a 28 de Novembro de 2012.
- British Geological Survey* (2012) – Acedido a 29 de Novembro de 2012, em: <http://www.bgs.ac.uk>. Acedido a 29 de Novembro de 2012.



## **ANEXOS**

**ANEXO 1 – IDENTIFICAÇÃO DAS UNIDADES DE TERRENO**



**Figura A1** – Identificação e respetiva localização das unidades de terreno.

**ANEXO 2 – VALORES DE REGRESSÃO LOGÍSTICA PARA CADA UNIDADE DE TERRENO**

**Quadro A1** – Média e desvio-padrão dos valores de suscetibilidade obtidos nos 10 ensaios efetuados para cada unidade de terreno e tipologia de movimentos de vertente.

UT	Deslizamentos Rotacionais		Deslizamentos Translacionais		Escoadas	
	Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão
1	0.213	0.084	0.428	0.171	0.525	0.050
2	0.015	0.015	0.526	0.402	0.477	0.034
3	0.014	0.014	0.490	0.451	0.503	0.081
4	0.046	0.051	0.472	0.418	0.658	0.064
5	0.021	0.009	0.462	0.321	0.518	0.051
6	0.125	0.093	0.538	0.285	0.418	0.077
7	0.141	0.053	0.475	0.353	0.619	0.040
8	0.123	0.043	0.506	0.272	0.408	0.034
9	0.171	0.075	0.395	0.324	0.507	0.049
10	0.559	0.142	0.590	0.281	0.380	0.060
11	0.593	0.138	0.485	0.140	0.549	0.081
12	0.274	0.054	0.702	0.187	0.611	0.038
13	0.533	0.130	0.741	0.233	0.707	0.033
14	0.210	0.055	0.755	0.183	0.794	0.028
15	0.129	0.031	0.865	0.111	0.687	0.035
16	0.221	0.074	0.876	0.159	0.766	0.035
17	0.621	0.121	0.787	0.250	0.826	0.024
18	0.475	0.114	0.832	0.219	0.785	0.029
19	0.590	0.126	0.818	0.216	0.799	0.034
20	0.806	0.080	0.852	0.194	0.666	0.035
21	0.812	0.074	0.797	0.219	0.705	0.032
22	0.590	0.105	0.806	0.209	0.705	0.032
23	0.261	0.077	0.655	0.218	0.555	0.051
24	0.280	0.085	0.797	0.224	0.680	0.060
25	0.210	0.072	0.694	0.299	0.752	0.055
26	0.324	0.077	0.754	0.241	0.723	0.043
27	0.190	0.044	0.746	0.238	0.724	0.043
28	0.147	0.038	0.845	0.126	0.442	0.045
29	0.418	0.169	0.888	0.160	0.432	0.064
30	0.092	0.024	0.915	0.078	0.626	0.038
31	0.210	0.112	0.840	0.176	0.602	0.067
32	0.358	0.156	0.786	0.291	0.545	0.088
33	0.625	0.136	0.568	0.306	0.739	0.089
34	0.404	0.115	0.626	0.233	0.527	0.050
35	0.502	0.121	0.769	0.185	0.583	0.049
36	0.665	0.137	0.606	0.296	0.773	0.042
37	0.714	0.140	0.700	0.148	0.454	0.042
38	0.744	0.104	0.546	0.280	0.647	0.064
39	0.702	0.135	0.659	0.255	0.601	0.061
40	0.634	0.162	0.686	0.119	0.337	0.055
41	0.862	0.100	0.708	0.216	0.302	0.042
42	0.633	0.186	0.801	0.131	0.195	0.038
43	0.458	0.195	0.843	0.078	0.276	0.055
44	0.202	0.074	0.727	0.234	0.153	0.036
45	0.118	0.069	0.691	0.358	0.072	0.023
46	0.889	0.107	0.766	0.325	0.456	0.079

47	0.110	0.055	0.739	0.323	0.798	0.061
48	0.038	0.029	0.743	0.312	0.782	0.055
49	0.100	0.030	0.851	0.125	0.549	0.050
50	0.061	0.033	0.787	0.274	0.687	0.057
51	0.087	0.063	0.741	0.295	0.574	0.072
52	0.130	0.038	0.846	0.189	0.384	0.053
53	0.338	0.117	0.842	0.128	0.473	0.048
54	0.238	0.069	0.550	0.266	0.697	0.064
55	0.111	0.036	0.656	0.337	0.542	0.083
56	0.260	0.076	0.794	0.130	0.408	0.058
57	0.465	0.131	0.754	0.167	0.293	0.044
58	0.558	0.115	0.772	0.193	0.363	0.035
59	0.560	0.174	0.681	0.250	0.353	0.047
60	0.690	0.129	0.839	0.190	0.586	0.023
61	0.468	0.140	0.844	0.091	0.514	0.037
62	0.638	0.129	0.785	0.178	0.436	0.031
63	0.471	0.118	0.847	0.089	0.465	0.032
64	0.338	0.120	0.717	0.285	0.244	0.035
65	0.462	0.130	0.823	0.132	0.513	0.043
66	0.097	0.021	0.834	0.123	0.492	0.051
67	0.120	0.031	0.884	0.088	0.447	0.045
68	0.041	0.025	0.855	0.190	0.347	0.043
69	0.106	0.080	0.851	0.218	0.470	0.067
70	0.120	0.073	0.826	0.259	0.261	0.046
71	0.126	0.068	0.812	0.189	0.566	0.075
72	0.368	0.248	0.885	0.167	0.454	0.084
73	0.014	0.005	0.582	0.399	0.600	0.069
74	0.120	0.036	0.574	0.412	0.548	0.074
75	0.139	0.037	0.598	0.414	0.477	0.071
76	0.071	0.020	0.620	0.308	0.596	0.054
77	0.065	0.020	0.674	0.361	0.417	0.062
78	0.107	0.100	0.767	0.336	0.397	0.069
79	0.139	0.102	0.876	0.145	0.515	0.070
80	0.127	0.061	0.877	0.133	0.576	0.093
81	0.181	0.105	0.747	0.267	0.723	0.063
82	0.158	0.089	0.802	0.215	0.519	0.069
83	0.570	0.122	0.729	0.268	0.650	0.081
84	0.603	0.119	0.775	0.235	0.540	0.074
85	0.561	0.126	0.768	0.235	0.519	0.079
86	0.711	0.102	0.729	0.279	0.636	0.070
87	0.687	0.108	0.768	0.252	0.611	0.069
88	0.686	0.096	0.759	0.254	0.539	0.081
89	0.660	0.106	0.684	0.284	0.533	0.075
90	0.763	0.072	0.712	0.263	0.491	0.067
91	0.692	0.112	0.708	0.268	0.643	0.061
92	0.802	0.070	0.788	0.196	0.534	0.060
93	0.561	0.137	0.796	0.204	0.605	0.065
94	0.841	0.065	0.775	0.235	0.624	0.060
95	0.833	0.060	0.732	0.236	0.503	0.066
96	0.836	0.071	0.742	0.283	0.332	0.047
97	0.911	0.038	0.666	0.316	0.433	0.065
98	0.429	0.059	0.247	0.127	0.513	0.024
99	0.597	0.134	0.516	0.270	0.730	0.030
100	0.464	0.138	0.554	0.373	0.456	0.036
101	0.275	0.152	0.508	0.327	0.442	0.095
102	0.554	0.094	0.179	0.098	0.516	0.032
103	0.446	0.049	0.359	0.095	0.381	0.028

104	0.539	0.172	0.542	0.310	0.398	0.077
105	0.666	0.087	0.449	0.264	0.572	0.037
106	0.490	0.144	0.533	0.235	0.675	0.053
107	0.523	0.058	0.311	0.074	0.484	0.023
108	0.659	0.059	0.348	0.176	0.627	0.030
109	0.421	0.056	0.241	0.086	0.601	0.027
110	0.616	0.079	0.381	0.146	0.541	0.034
111	0.401	0.068	0.680	0.280	0.686	0.063
112	0.106	0.067	0.628	0.236	0.571	0.071
113	0.149	0.063	0.333	0.257	0.481	0.059
114	0.450	0.078	0.427	0.148	0.402	0.039
115	0.363	0.041	0.438	0.114	0.484	0.032
116	0.340	0.042	0.358	0.129	0.563	0.018
117	0.668	0.113	0.712	0.237	0.667	0.034
118	0.485	0.156	0.344	0.247	0.608	0.084
119	0.666	0.142	0.363	0.328	0.563	0.049
120	0.613	0.160	0.428	0.361	0.549	0.047
121	0.493	0.163	0.374	0.322	0.541	0.074
122	0.249	0.058	0.251	0.123	0.527	0.033
123	0.185	0.078	0.502	0.314	0.313	0.056
124	0.628	0.164	0.643	0.332	0.428	0.095
125	0.132	0.076	0.707	0.255	0.623	0.058
126	0.293	0.082	0.684	0.201	0.510	0.037
127	0.444	0.065	0.715	0.223	0.532	0.059
128	0.433	0.064	0.733	0.188	0.482	0.060
129	0.218	0.073	0.572	0.301	0.646	0.052
130	0.454	0.063	0.568	0.269	0.551	0.052
131	0.323	0.080	0.545	0.206	0.394	0.041
132	0.797	0.038	0.579	0.310	0.638	0.054
133	0.408	0.113	0.516	0.247	0.432	0.056
134	0.810	0.038	0.499	0.243	0.444	0.047
135	0.859	0.026	0.384	0.181	0.533	0.051
136	0.733	0.059	0.279	0.163	0.346	0.036
137	0.490	0.050	0.454	0.283	0.489	0.026
138	0.582	0.040	0.503	0.216	0.503	0.026
139	0.571	0.093	0.407	0.159	0.397	0.042
140	0.722	0.097	0.602	0.249	0.497	0.059
141	0.537	0.079	0.616	0.186	0.354	0.038
142	0.636	0.121	0.536	0.252	0.225	0.035
143	0.698	0.062	0.696	0.244	0.342	0.050
144	0.758	0.077	0.685	0.298	0.324	0.059
145	0.631	0.073	0.544	0.250	0.385	0.056
146	0.502	0.094	0.518	0.274	0.402	0.063
147	0.567	0.096	0.431	0.270	0.455	0.050
148	0.522	0.101	0.315	0.217	0.384	0.041
149	0.476	0.112	0.295	0.180	0.339	0.033
150	0.480	0.107	0.292	0.194	0.267	0.030
151	0.287	0.080	0.386	0.240	0.238	0.030
152	0.487	0.097	0.596	0.261	0.444	0.047
153	0.416	0.079	0.452	0.434	0.704	0.033
154	0.042	0.024	0.429	0.359	0.572	0.075
155	0.591	0.136	0.581	0.241	0.617	0.078
156	0.306	0.088	0.643	0.241	0.676	0.049
157	0.366	0.075	0.642	0.192	0.539	0.048
158	0.408	0.060	0.469	0.218	0.583	0.038
159	0.327	0.046	0.562	0.187	0.370	0.039
160	0.543	0.065	0.628	0.197	0.407	0.056

161	0.211	0.057	0.719	0.194	0.360	0.040
162	0.164	0.060	0.681	0.189	0.346	0.041
163	0.189	0.059	0.684	0.180	0.537	0.049
164	0.153	0.079	0.679	0.233	0.394	0.060
165	0.507	0.099	0.458	0.204	0.437	0.053
166	0.605	0.042	0.490	0.162	0.453	0.040
167	0.445	0.057	0.257	0.158	0.555	0.036
168	0.445	0.057	0.247	0.185	0.675	0.028
169	0.566	0.081	0.139	0.066	0.664	0.023
170	0.742	0.068	0.129	0.068	0.527	0.026
171	0.755	0.073	0.138	0.087	0.456	0.027
172	0.725	0.090	0.140	0.124	0.368	0.031
173	0.750	0.066	0.134	0.115	0.456	0.029
174	0.903	0.027	0.158	0.106	0.547	0.034
175	0.866	0.087	0.373	0.284	0.669	0.046
176	0.800	0.159	0.342	0.276	0.504	0.073
177	0.744	0.127	0.085	0.068	0.445	0.061
178	0.857	0.060	0.071	0.059	0.516	0.027
179	0.908	0.055	0.122	0.096	0.387	0.038
180	0.880	0.051	0.175	0.157	0.675	0.042
181	0.765	0.090	0.154	0.155	0.505	0.058
182	0.881	0.060	0.073	0.058	0.546	0.043
183	0.878	0.055	0.070	0.067	0.585	0.035
184	0.872	0.072	0.057	0.051	0.561	0.044
185	0.955	0.020	0.095	0.087	0.532	0.035
186	0.849	0.062	0.076	0.084	0.542	0.045
187	0.803	0.069	0.069	0.071	0.486	0.045
188	0.759	0.070	0.108	0.111	0.455	0.031
189	0.713	0.072	0.111	0.100	0.382	0.041
190	0.670	0.110	0.091	0.072	0.440	0.052
191	0.829	0.047	0.139	0.075	0.509	0.039
192	0.868	0.029	0.201	0.142	0.514	0.051
193	0.407	0.087	0.213	0.205	0.400	0.031
194	0.472	0.077	0.145	0.074	0.508	0.032
195	0.288	0.082	0.226	0.128	0.429	0.036
196	0.405	0.089	0.243	0.142	0.489	0.030
197	0.480	0.086	0.407	0.183	0.379	0.022
198	0.685	0.067	0.464	0.391	0.682	0.031
199	0.360	0.041	0.603	0.164	0.404	0.036
200	0.310	0.057	0.693	0.255	0.363	0.057
201	0.040	0.017	0.378	0.292	0.523	0.032
202	0.042	0.021	0.406	0.342	0.574	0.055
203	0.831	0.163	0.375	0.309	0.410	0.107
204	0.837	0.089	0.514	0.262	0.463	0.086
205	0.577	0.156	0.644	0.303	0.489	0.072
206	0.493	0.166	0.665	0.265	0.241	0.047
207	0.764	0.071	0.720	0.233	0.202	0.045
208	0.763	0.119	0.749	0.284	0.386	0.062
209	0.686	0.050	0.560	0.300	0.571	0.046
210	0.699	0.061	0.232	0.126	0.571	0.040
211	0.811	0.031	0.293	0.145	0.490	0.027
212	0.844	0.048	0.253	0.128	0.455	0.035
213	0.891	0.034	0.163	0.094	0.407	0.039
214	0.917	0.030	0.166	0.122	0.432	0.031
215	0.891	0.050	0.204	0.157	0.479	0.042
216	0.935	0.022	0.202	0.189	0.539	0.034
217	0.919	0.046	0.153	0.117	0.534	0.052

---

218	0.853	0.069	0.097	0.062	0.460	0.042
219	0.908	0.034	0.113	0.077	0.501	0.034
220	0.877	0.046	0.250	0.180	0.404	0.036
221	0.893	0.055	0.219	0.191	0.474	0.053
222	0.849	0.046	0.184	0.150	0.578	0.035
223	0.799	0.046	0.126	0.061	0.534	0.030
224	0.627	0.069	0.146	0.118	0.592	0.033
225	0.621	0.073	0.214	0.109	0.466	0.036
226	0.501	0.067	0.287	0.134	0.474	0.033
227	0.585	0.085	0.382	0.270	0.694	0.033
228	0.340	0.040	0.341	0.180	0.578	0.035
229	0.411	0.188	0.383	0.306	0.283	0.056
230	0.243	0.074	0.221	0.168	0.629	0.029
231	0.075	0.040	0.477	0.374	0.547	0.038
232	0.088	0.045	0.491	0.317	0.557	0.022
233	0.046	0.015	0.485	0.211	0.554	0.032
234	0.106	0.040	0.362	0.188	0.560	0.044
235	0.216	0.144	0.499	0.305	0.725	0.045
236	0.258	0.105	0.342	0.263	0.318	0.036
237	0.340	0.073	0.297	0.139	0.460	0.021
238	0.279	0.058	0.242	0.208	0.579	0.035
239	0.193	0.051	0.377	0.113	0.437	0.028
240	0.118	0.034	0.405	0.224	0.501	0.039
241	0.339	0.138	0.197	0.134	0.565	0.051
242	0.251	0.060	0.170	0.094	0.633	0.029
243	0.284	0.080	0.186	0.151	0.513	0.057
244	0.553	0.075	0.386	0.259	0.454	0.035
245	0.431	0.153	0.340	0.330	0.338	0.054
246	0.499	0.166	0.281	0.337	0.493	0.075
247	0.595	0.077	0.219	0.296	0.421	0.057
248	0.256	0.224	0.368	0.409	0.254	0.064
249	0.743	0.072	0.365	0.179	0.195	0.026
250	0.313	0.149	0.374	0.329	0.201	0.035
251	0.589	0.173	0.460	0.367	0.076	0.016
252	0.500	0.105	0.591	0.249	0.129	0.037
253	0.911	0.031	0.286	0.161	0.319	0.066
254	0.893	0.037	0.453	0.286	0.178	0.040
255	0.250	0.104	0.605	0.282	0.142	0.028
256	0.240	0.161	0.408	0.347	0.194	0.033
257	0.362	0.053	0.482	0.361	0.334	0.041
258	0.232	0.199	0.335	0.415	0.474	0.095
259	0.496	0.134	0.362	0.310	0.168	0.036
260	0.399	0.083	0.466	0.321	0.347	0.038
261	0.756	0.051	0.449	0.221	0.487	0.045

---